

# **TOLÉRANCE AU STRESS HYDRIQUE DES SEMIS D'ÉPINETTE NOIRE CULTIVÉS DANS LES RÉCIPIENTS 113-25 – EFFETS DE LA DATE DE PLANTATION ET DU TRAITEMENT DE JOURS-COURTS**

Par :

Denis Walsh et Daniel Lord



Ce document est disponible en format PDF à l'adresse suivante : [http : //dsf.uqac.ca/boreale/](http://dsf.uqac.ca/boreale/)  
© Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale, 2012.

Le contenu de ce document peut être reproduit en autant que la source soit mentionnée.

***Correspondance***

Université du Québec à Chicoutimi  
Partenaire du Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale  
Département des Sciences fondamentales  
a/s Daniel Lord  
555, boul. de l'Université  
Chicoutimi, Québec, G7H 2B1  
Tél. : 418-545-5011, poste 5064; Télécopieur : 418-545-5012  
  
Courrier électronique : [Daniel\\_Lord@uqac.ca](mailto:Daniel_Lord@uqac.ca)

# **TOLÉRANCE AU STRESS HYDRIQUE DES SEMIS D'ÉPINETTE NOIRE CULTIVÉS DANS LES RÉCIPIENTS 113-25 – EFFETS DE LA DATE DE PLANTATION ET DU TRAITEMENT DE JOURS-COURTS**

Par :

Denis Walsh, M. Sc.

et

Daniel Lord, Ph. D.

Université du Québec à Chicoutimi

Département des Sciences fondamentales

555, boulevard de l'Université

Chicoutimi, Québec, Canada

G7H 2B1

Décembre 2012





## REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, direction régional du Saguenay-Lac-St-Jean. Les auteurs sont redevables en premier lieu à M. Jean-Pierre Girard du MRNF région 02 dont la collaboration et son support ont été indéfectibles tout au long du projet. Nous adressons aussi des remerciements à M. Esteban Gonzales, étudiant au deuxième cycle en biologie pour sa participation à la réalisation des différentes étapes du projet.



## RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est de comparer la tolérance aux stress hydriques en conditions contrôlées de plants de très petites dimensions d'épinette noire produits en récipients 113-25 à celle des plants de dimensions conventionnelles produits en récipients 67-50 et 45-110. Puisque le traitement de jours-courts est exigé pour les plants produits en récipient 113-25, ce lot a été traité en jours-courts avant l'expérimentation (113JC). Nous avons aussi inclus dans notre dispositif à titre de témoin un lot de plants 113-25 qui n'a pas été traité en jours-courts afin d'évaluer l'incidence de ce traitement sur la tolérance au stress hydrique (113T). Notre dispositif comprenait trois dates d'expérimentation: juin pour étudier les lots de plants devant se qualifier du 30 mai au 22 juin; juillet pour les lots de plants devant se qualifier du 23 juin au 20 juillet; août pour les lots de plants devant se qualifier du 21 juillet au 15 août. Des mesures des potentiels hydriques préaube et mijour ainsi que des échanges gazeux ont été réalisées périodiquement durant les trois semaines du stress hydrique et de la semaine de récupération qui suivait. Des mesures de croissance ont été réalisées uniquement à la dernière date de mesure. En juin, les deux lots en récipients 113 ont moins bien récupéré comparativement aux deux autres. Les seuls cas de mortalité concernaient les 113JC (3%) et 113T (6%) tandis que 50% des plants 45-110 présentaient des dommages foliaires modérés. Chez les plants 113JC, le traitement de jours-courts avant les trois expériences a augmenté le rendement photosynthétique. En juillet, les plants 113T n'ont pas récupéré leur capacité photosynthétique après la période de sécheresse. Le traitement de jours-courts n'a pas induit une plus grande résistance à la sécheresse chez les lots de plants 113-25 livrable en juin puisqu'il n'est pas possible de faire suivre le traitement photopériodique par une période d'endurcissement avant la livraison en forêt. Les lots 113-25 livrables en juin sont donc plus à risque que ceux livrables en juillet ou août. Des méthodes pour augmenter la résistance au stress hydrique sont discutées.

**Mots-clés:** mini-plant, épinette noire, *Picea mariana*, dimension des plants, photosynthèse, stress hydrique, relation hydrique, potentiel hydrique, traitement de jours-courts.



## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iii
RÉSUMÉ.....	v
TABLE DES MATIÈRES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	xi
INTRODUCTION.....	1
MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	4
<i>Matériel végétal et conditions de culture.....</i>	<i>4</i>
<i>Potentiel hydrique et échanges gazeux.....</i>	<i>4</i>
<i>Croissance des plants.....</i>	<i>5</i>
<i>Dispositif expérimental et analyses statistiques.....</i>	<i>5</i>
RÉSULTATS.....	5
PLANTATION DE JUIN.....	5
<i>Potentiel hydrique.....</i>	<i>6</i>
<i>Échanges gazeux.....</i>	<i>7</i>
<i>Croissance.....</i>	<i>8</i>
PLANTATION DE JUILLET.....	8
<i>Potentiel hydrique.....</i>	<i>10</i>
<i>Échanges gazeux.....</i>	<i>10</i>
<i>Croissance.....</i>	<i>11</i>
PLANTATION D'AOÛT.....	12
<i>Potentiel hydrique.....</i>	<i>12</i>
<i>Échanges gazeux.....</i>	<i>13</i>
<i>Croissance.....</i>	<i>15</i>
DISCUSSION.....	15
CONCLUSION.....	23
RÉFÉRENCES.....	24
ANNEXE 1. Calendrier des trois plantations (juin, juillet, août).....	31
ANNEXE 2. Caractéristiques initiales des quatre types de plant d'épinette noire utilisés (A) pour la plantation de juin,	

(B) la plantation de juillet, (C) la plantation d'août.

Moyenne  $\pm$  erreur-type, n = 20.....32

**ANNEXE 3A. Sommaire des conditions environnementales dans le tunnel durant la plantation de juin. (A) Teneur en eau du sol. (B) Température minimale et maximale de l'air. (C) Déficit de pression de vapeur (DPV) et humidité relative de l'air (HR).....33**

**ANNEXE 3B. Sommaire des conditions environnementales dans le tunnel durant la plantation de juillet. (A) Teneur en eau du sol. (B) Température minimale et maximale de l'air. (C) Déficit de pression de vapeur (DPV) et humidité relative de l'air (HR).....34**

**ANNEXE 3C. Sommaire des conditions environnementales dans le tunnel durant la plantation d'août. (A) Teneur en eau du sol. (B) Température minimale et maximale de l'air. (C) Déficit de pression de vapeur (DPV) et humidité relative de l'air (HR).....35**

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.</b> Sommaire de l'ANOVA du potentiel hydrique préaube ( $\psi_{\text{préaube}}$ ) et du potentiel hydrique à mijour ( $\psi_{\text{mijour}}$ ) de l'expérience juin (A). Valeurs de $P$ des contrastes entre les différents types de plant du traitement de stress hydrique de l'interaction T x J x R (B).....	6
<b>Tableau 2.</b> Sommaire de l'ANOVA de la photosynthèse nette ( $P_n$ ), de la conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{ve}$ ) et de l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) de l'expérience juin.....	8
<b>Tableau 3.</b> Sommaire de l'ANOVA de la longueur des deux plus longues racines, du rapport biomasse tige/racines, du taux relatif de croissance total ( $TRC_{\text{Total}}$ ) ainsi que du taux relatif de croissance de la biomasse racinaire ( $TRC_{\text{Racines}}$ ) à la fin de la plantation de juin (A). Moyennes et intervalles de confiance à 95% (I.C. 95%) des paramètres de croissance mesurés à la fin de l'expérience juin (B). Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes à $P \leq 0,05$ .....	9
<b>Tableau 4.</b> Pourcentage de dommages foliaires des plants du traitement de stress hydrique à la fin de la plantation de juin.....	10
<b>Tableau 5.</b> Sommaire de l'ANOVA du potentiel hydrique préaube ( $\psi_{\text{préaube}}$ ) et du potentiel hydrique à mijour ( $\psi_{\text{mijour}}$ ) de la plantation de juillet.....	11
<b>Tableau 6.</b> Sommaire de l'ANOVA de la photosynthèse nette ( $P_n$ ), de la conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{ve}$ ) et de l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) de la plantation de juillet (A). Valeurs de $P$ des contrastes entre les types de plant du traitement de stress hydrique de l'interaction T x R x J (B).....	12
<b>Tableau 7.</b> Sommaire de l'ANOVA de la longueur des deux plus longues racines, du rapport biomasse tige/racines, du taux relatif de croissance total ( $TRC_{\text{Total}}$ ) ainsi que du taux relatif de croissance de la biomasse racinaire ( $TRC_{\text{Racines}}$ ) à la fin de la plantation de juillet (A). Moyennes et intervalles de confiance à 95% (I.C. 95%) des paramètres de croissance mesurés à la fin de l'expérience juillet (B). Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes à $P 0,05$ .....	14

<b>Tableau 8.</b> Sommaire de l'ANOVA du potentiel hydrique préaube ( $\psi_{\text{réaube}}$ ) et du potentiel hydrique à mijour ( $\psi_{\text{mijour}}$ ) de la plantation d'août (A). Valeurs de $P$ des contrastes entre les types de plant de l'interaction R x J (B).....	14
<b>Tableau 9.</b> Sommaire de l'ANOVA de la photosynthèse nette ( $P_n$ ), de la conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{ve}$ ) et de l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) de la plantation d'août.....	16
<b>Tableau 10.</b> Sommaire de l'ANOVA de la longueur des deux plus longues racines, du rapport biomasse tige/racines, du taux relatif de croissance total ( $TRC_{\text{Total}}$ ) ainsi que du taux relatif de croissance de la biomasse racinaire ( $TRC_{\text{Racines}}$ ) à la fin de l'expérience août (A). Moyennes et intervalles de confiance à 95% (I.C. 95%) des paramètres de croissance mesurés à la fin de la plantation d'août. Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes à $P \leq 0,05$ (B).....	17



## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b> Potentiel hydrique préaube ( $\Psi_{\text{préaube}}$ ) de la plantation de juin en fonction de l'interaction T x J (A) et des types de plant R (B). Potentiel hydrique à mijour ( $\Psi_{\text{mijour}}$ ) de la plantation de juin en fonction de l'interaction T x J (C), des types de plant R (D) et de l'interaction T x J x R (E). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes ou de * sont significativement différentes à $P < 0,05$ . La flèche indique la fin du traitement de stress hydrique.....	7
<b>Figure 2.</b> Influence du DPV sur $g_{ve}$ chez les plants témoins de la plantation de juin. Ellipse normale bivariée à $P = 0,95$ .....	8
<b>Figure 3.</b> Photosynthèse nette ( $P_n$ ) de la plantation de juin en fonction de l'interaction T x J (A) et des types de plant R (B). Conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{ve}$ ) de l'expérience juin en fonction de l'interaction T x J (C) et de l'interaction T x R (D). Efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE) de la plantation de juin en fonction des jours J (E) et de l'interaction T x R (F). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes ou de * sont significativement différentes à $P < 0,05$ (En D et F, stress et témoin sont analysés séparément). La flèche indique la fin du traitement de stress hydrique.....	9
<b>Figure 4.</b> Dommages foliaires des plants du traitement stress hydrique de la plantation de juin.....	10
<b>Figure 5.</b> Potentiel hydrique préaube ( $\Psi_{\text{préaube}}$ ) de la plantation de juillet en fonction de l'interaction T x J (A) et des types de plant R (B). Potentiel hydrique à mijour ( $\Psi_{\text{mijour}}$ ) de la plantation de juillet en fonction de l'interaction T x J (C) et T x R (D). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes ou de * sont significativement différentes à $P < 0,05$ (En D, stress et témoin sont analysés séparément). La flèche indique la fin du traitement de stress hydrique.....	11
<b>Figure 6.</b> Photosynthèse nette ( $P_n$ ) de la plantation de juillet en fonction de l'interaction T x J (A), des types de plant R (B) et de l'interaction T x R x J (C). Conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{ve}$ ) de la plantation de juillet en fonction de l'interaction T x J (D), T x R (E) et T x R x J (F). Efficacité de l'utilisation de l'eau	

(EUE) de la plantation de juillet en fonction de l'interaction T x J (G), T x R (H) et T x R x J (I). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes ou de \* sont significativement différentes à  $P < 0,05$  (En E et H, stress et témoin sont analysés séparément); n.s. non-significatif à  $P < 0,05$ . La flèche indique la fin du traitement de stress hydrique.....13

**Figure 7.** Potentiel hydrique préaube ( $\Psi_{\text{préaube}}$ ) de la plantation d'août en fonction de l'interaction T x J (A) et des types de plant R (B). Potentiel hydrique à mijour ( $\Psi_{\text{mijour}}$ ) de la plantation d'août en fonction de l'interaction T x J (C), des types de plant R (D) et de l'interaction R x J (E). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes ou de \* sont significativement différentes à  $P < 0,05$ . La flèche indique la fin du traitement de stress hydrique.....15

**Figure 8.** Photosynthèse nette ( $P_n$ ) de la plantation d'août en fonction de l'interaction T x J (A) et des types de plant R (B). Conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{\text{ve}}$ ) de la plantation d'août en fonction de l'interaction T x J (C) et des types de plant R (D). Efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE) de la plantation d'août en fonction de l'interaction T x J (E) et des types de plant R (H). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes ou de \* sont significativement différentes à  $P < 0,05$ . La flèche indique la fin du traitement de stress hydrique.....16

## INTRODUCTION

La taille des plants forestiers doit être adaptée aux caractéristiques des sites à reboiser pour assurer le succès de la plantation (Thiffault et al. 2003). C'est pour cette raison qu'on utilise différents types de récipients pour la production des espèces résineuses au Québec; le volume de ces alvéoles varie de 25 cm<sup>3</sup> pour les plants de très petites dimensions (PTPD) jusqu'à 350 cm<sup>3</sup> pour les plants de fortes dimensions (PFD) (MRNF 2000; Dancause 2008). Les plants de fortes dimensions d'épinette ont un potentiel de croissance supérieur à ceux des plants standards (Thiffault 2004). En général, le taux de survie en plantation s'accroît avec la taille des plants reboisés (Thompson 1985). Cependant, ce type de plants est dispendieux à produire et à reboiser (Dancause 2008). Par exemple, les coûts de production en serre du pin loblolly aux États-Unis augmentent de 78% lorsque la densité des semis passe de 1 033 plants/m<sup>2</sup> à 883 plant/m<sup>2</sup> (Guldin 1982). Pour cette raison, l'utilisation de plants de plus petites dimensions serait mieux appropriée dans les peuplements purs d'épinette noire de la forêt boréale commerciale où la végétation de compétition est moins importante.

Au départ, les mini-plants forestiers ont été développés comme «transplants», soit un système de production où les semis sont cultivés en serre dans de petites alvéoles (< 25 cm<sup>3</sup>) puis sont repiqués en champ pour produire des plants à racines-nues (Hee et al. 1988; Tanaka et al. 1988; Hahn 1990; Généré 1998). Alternativement, les mini-plants peuvent aussi être repiqués dans des récipients de plus grand volume dans un système de production appelé «plug-to-plug» (Scarrat 1989; Landis 2007).

Dans les années 70, des tests ont été réalisés pour vérifier si on pouvait utiliser les mini-plants directement sur les sites de reboisement. Sutherland et Day (1988) ont révisé différents essais de plantations de mini-plants (vol. < 35 cm<sup>3</sup>) d'épinette blanche et d'épinette noire. Des essais réalisés en Colombie-Britannique ont montré que les mini-plants cultivés dans le récipient «Walters bullets» (22 cm<sup>3</sup>) pouvaient rivaliser avec des plants cultivés dans des récipients styrobloc-2 (40 cm<sup>3</sup>) tant au point de vue de la survie que de la croissance en hauteur (Gardner 1981). Dans un autre essai en Colombie Britannique, le taux de survie des semis cultivés dans le récipient «Walter bullets» de 22 cm<sup>3</sup> étaient comparable à celui des semis cultivés dans le styrobloc-2 de 40 cm<sup>3</sup> pour la majorité des espèces testées même si la croissance en hauteur était légèrement inférieure après cinq

ans en plantation (Arnott 1981). Un essai a aussi été réalisé en Ontario avec des mini-plants d'épinette noire cultivé dans des cavités de 1,27 cm de diam. x 4,45 cm de prof. (Whaley et Buse 1996). En Suède, les mini-plants cultivés pendant 8-12 semaines dans des récipients de 10-20 ml à des densités de 1 500-2 000 semis/m<sup>2</sup> sont utilisés à petite échelle pour diminuer les coûts de production et introduire une alternative plus «naturelle» aux techniques actuelles de reboisement (Lindstrom et al. 2005). Ces mini-plants de 5-7 cm de hauteur résistent mieux aussi aux attaques du charançon du pin (*Hyelobius abietis* (L.)) (Danielsson et al. 2008).

Ces dernières années, les chercheurs de l'UQAC ont développé, en collaboration avec le MRNF-02 et les Centres régionaux de production de plants forestiers, des régies de production pour des plants cultivés dans des récipients de petites dimensions dont chacune des 126 alvéoles a un volume de 25 cm<sup>3</sup> (Hébert et al. 2005). Les essais préliminaires en plantation ont montré que le taux de survie et la croissance de ces plants de très petites dimensions (PTPD) pouvaient rivaliser avec ceux produits en récipient 67-50, au moins là où la concurrence végétale est faible ou absente (Walsh et al. 2011). Ces travaux ont permis le développement d'un récipient amélioré, le 113-25. Dans la région 02 (Saguenay Lac-St-Jean), 86,9 millions de plants d'épinette noire produits en récipients 126-25 ou 113-25 ont déjà été mis en terre depuis 2003 (Audrey Murray, MRNF, communication personnelle). Le taux de survie des PTPD des plantations 2003 et 2004 mesuré en 2005 était supérieur ou égal à 95% (J.-P. Girard, communication personnelle).

La stagnation des plantations («growth check») peut survenir dans les deux années suivants la plantation pour l'épinette, à cause d'une fertilité limitée du site, des stress hydriques ou suite aux dommages causés par le gel (Grossnickle 2000). Immédiatement après la plantation, le semis est soumis à une forte demande évaporatoire tandis que l'accès à l'eau est restreint à cause du contact encore mal établi entre les racines et le sol (Margolis et Brand 1990). Le stress hydrique que subit les plants au moment de la mise en terre est principalement attribuable au confinement des racines dans la motte de tourbe, limitant ainsi la capacité de la plante à répondre à la demande en eau causée par la transpiration (Orlander et Due 1986; Grossnickle et Folk 1993; Balinski et al 1995). Les semis qui viennent d'être plantés dépendent pour leur survie immédiate du système racinaire produit durant la culture en pépinière; de ce fait, les plants qui possèdent

un système racinaire plus imposant auront une meilleure capacité d'évitement des stress et s'établiront correctement (Grossnickle 2005). En général, le taux de survie s'accroît avec la taille des plants reboisés (Burdett 1979; Thompson 1985). Par contre, Grossnickle (2012) citent des exemples de plantations à racines nues sur des sites xériques où la relation était inverse. Un contact intime entre les racines et l'eau disponible dans le sol, une faible résistance aux flux de l'eau dans le semis et un contrôle des pertes excessives en eau sont des attributs importants favorisant la survie et la croissance rapides des semis en plantation (Margolis et Brand 1990). Un plant dont la croissance est rapide s'acclimatera plus rapidement puisque la croissance du système racinaire permettra un meilleur contact sol-plant, réduisant le stress hydrique. Burdett (1979) a observé que la survie de *Pinus contorta* Dougl. était en étroite relation avec sa capacité de croissance racinaire.

La sécheresse est un phénomène important en forêt boréale dont il faut tenir compte dans les plantations forestières. Selon Girardin et al. (2004), le réchauffement climatique observé au siècle dernier n'a pas eu d'incidence sur la sévérité des sécheresses estivales dans l'Est du Canada. Durant ce siècle, les précipitations ont augmenté de 5-35% dans la portion sud du Canada et le climat devenait graduellement plus chaud et humide; les surface affectées par des conditions anormalement sèches ont aussi diminué graduellement (Zhang et al. 2000). Les épisodes de sécheresse extrême de grande amplitude étaient d'environ un à deux événements par décade pour le siècle dernier dans l'est du Canada (Girardin et al. 2006). Pour le Canada et la période s'étendant de 1940 à 2002, les cinq étés (JJA) les plus secs étaient 2002, 1941, 1998, 1961 et 1940 ce qui coïncidait avec des sécheresses légères selon l'indice de Palmer de sévérité de la sécheresse (PDSI) (Shabbar et Skinner 2004). Même si la tendance est à une diminution progressive de l'indice de sécheresse tout au long du siècle dernier, il s'est quand même produit 10 épisodes de sécheresse légère à modérée au cours de ce siècle dans l'Est du Canada (Girardin et Wotton 2009). Le réchauffement climatique global appréhendé causé par la hausse du CO<sub>2</sub> pourrait modifier ce patron. L'augmentation des précipitations projetée par les modèles climatiques globaux serait insuffisante pour compenser les augmentations des températures et maintenir le taux d'humidité du sol au niveau actuel ce qui causerait une augmentation des sécheresses et des feux de forêt (Girardin et Mudelsee 2008; Herrington 2010). L'incidence des périodes de sécheresse serait plus

grande dans le futur puisqu'on prévoit une augmentation de l'évapotranspiration et une diminution simultanée de l'humidité du sol (Saxe et al. 2001; Van Herk et al. 2011).

L'épinette noire est plus sensible au stress hydrique comparativement à d'autres conifères poussant en forêt boréale, en partie en raison de son système racinaire peu profond et par une sensibilité plus grande au déficit de pression de vapeur de l'air (Grossnickle et Blake 1986; Lamhamedi et Bernier 1994, Hébert et al. 2006). L'épinette noire est moins bien adaptée physiologiquement aux stress hydrique que le pin gris; ce dernier peut maintenir sa turgescence à un contenu relatif en eau plus bas (74%) que l'épinette noire (86%) (Fan et al. 1994). Les relations entre la taille des plants d'épinette au moment de la plantation et les réponses physiologiques induites par les stress hydriques ont été étudiées au Québec sur des plants de plus fortes dimensions, soit les plants produits en récipients 45-110 et les PFD (Jobidon et al. 1998; Lamhamedi et al. 1998). Très peu de travaux de recherche ont été publiés sur la résistance à la sécheresse de plants produits dans des cavités inférieures à 50 cm<sup>3</sup>. Il est reconnu que les mini-plants sèchent plus rapidement que les plants conventionnels (Lindstrom et al. 2005). Dans un essai de plantation de mini-plants en Suède, le taux de survie était de 85% et entre 5-15% des semis mourraient à cause de la sécheresse (Oleras 2008). Dans une plantation expérimentale en forêt boréale, Walsh et Lord (2003) ont noté une mortalité plus importante des mini-plants de pin gris 126-25 comparativement aux 67-50 lorsque ceux-ci étaient plantés en mai, mortalité probablement causée par une période de sécheresse et un endurcissement insuffisant. Le faible volume de la motte entourant les racines de même que sa faible profondeur pourrait laisser croire que ce type de plants forestiers serait moins tolérant à la sécheresse.

Walsh et Lord (2012) ont étudié l'effet des stress hydriques sur les mini-plants d'épinette noire en milieu contrôlé; leur conclusion est que les mini-plants d'épinette noire cultivés en récipient 113-25 ne présentent pas plus de risque de mortalité causée par la sécheresse que les plants conventionnels. Cependant, deux facteurs importants n'ont pas été pris en compte dans cette étude, soit 1) la date de plantation et 2) la phénologie des plants. La tolérance au stress varie de façon cyclique durant la croissance des plants résineux et est liée au développement des bourgeons terminaux et la dormance des plants (Grossnickle et Folk 2003). On doit tenir compte de ces paramètres lorsqu'on reboise tout au cours de la période végétative qui s'étend du printemps à

l'automne. D'ailleurs, les résultats de [Walsh et al. \(2002; 2011\)](#) montrent que la mortalité des plants d'épinette noire est plus élevée lorsque les semis sont plantés en mai ou septembre comparativement à ceux plantés durant l'été. En Colombie Britannique, les forestiers ont développé des calendriers de production différents pour les plants reboisés au printemps ou à l'été ([Kiiskila 2005](#)). Les plants reboisés au printemps sont des lots 1+0 entreposés au froid durant tout l'hiver et livrés lorsqu'ils sont encore en dormance; les plants reboisés durant l'été sont des lots 1+0 ou 2+0 qui ont eu un traitement de jours-courts 5-6 semaines avant la livraison ([Grossnickle et Folk 2003; Kiiskila 2005](#)). En Finlande, le traitement de jours-courts est aussi utilisé pour induire la dormance de l'épinette de Norvège et allonger la saison de plantation jusqu'à la fin de l'été ([Helenius 2005; Luoranen et al. 2006](#)).

Les traitements de jours-courts est une méthode utilisée pour induire la cessation de la croissance en hauteur de la tige afin d'atteindre les dimensions désirées ([Grossnickle 2000](#)). Ce traitement induit la dormance et la tolérance au gel ainsi qu'au stress hydrique ([Grossnickle 2000](#)). L'effet du traitement de jours-courts sur la résistance au stress hydrique n'est pas toujours confirmé expérimentalement. Il s'est avéré que l'allongement de la durée du traitement de jours-courts de 0 à 15 jours augmente la résistance au stress hydrique de l'épinette blanche ([Tan 2007](#)). Pourtant, [Tan et al. \(2008\)](#) ont aussi montré que pour la même espèce, des traitements de jours-courts aussi long que 10 à 15 jours étaient contre-productifs et que le taux de survie en plantation était plus élevé si le traitement de jours-courts était raccourci. Un traitement de jours-courts de trois semaines n'a pas influencé le taux de survie de semis de pin d'Écosse plantés durant l'été ([Luoranen et Rikala 2012](#)). En situation de déficit hydrique, la vigueur et le potentiel hydrique ( $\Psi$ ) des plants traités ne se différencient pas de ceux non-traités ([Luoranen et al. 2007](#)). Donc, ce traitement n'est pas toujours nécessaire pour les plantations estivales. [Luoranen et al. \(2005\)](#) ont aussi montré que la date de plantation de mai à juillet n'a pas eu d'incidence sur la survie des épinettes de Norvège plantés lorsqu'ils étaient en croissance. En Finlande, la mortalité des plants d'épinette de Norvège plantés en croissance est négligeable lorsque la sécheresse ne dépasse pas 2 à 3 semaines ([Helenius 2005](#)). Dans le cas des mini-plants d'épinette noire produits au Québec en récipient 113-25, le traitement de jours-courts est exigé pour répondre aux normes de qualité du MRNF ([MRNF 2011](#)). Ce traitement a pour but de contrôler la hauteur qui doit se situer

entre 10-17 cm au moment de la livraison. Le traitement de jours-courts diminue l'incidence des bris mécaniques lors du transport des plants vers leur site de reboisement en induisant la lignification de la tige, mais on ne sait pas s'il influence la résistance à la sécheresse.

L'évaluation de la qualité des lots de plants avant la plantation est largement répandue ([Mattsson 1996; Mohammed 1996](#)). Ces évaluations sont basées majoritairement sur des critères morphologiques comme la hauteur et le diamètre de la tige. Au Québec, les normes de qualité sont basées sur la hauteur, le diamètre et le rapport H/D et sont modulées en fonction des différents types de productions ([MRNF 2011](#)). Cependant, les paramètres morphologiques ne décrivent pas entièrement la vigueur physiologique des semis ([Mexal et Landis 1990](#)). Une approche plus récente intègre les paramètres physiques à une évaluation physiologique des semis ([Grossnickle et al. 1991b](#)). D'ailleurs en Ontario, des mesures physiologiques telles que la photosynthèse, la fluorescence de la chlorophylle et le potentiel hydrique sont utilisées pour vérifier la vitalité de certains lots de plants forestiers avant le reboisement ([Colombo et al. 2001](#)). Le déficit hydrique peut aisément être mesuré à l'aide de la méthode de la chambre à pression ([Ritchie et Hinckley 1975; Turner 1988](#)). Le potentiel hydrique préaube ( $\Psi_{\text{préaube}}$ ) et mijour ( $\Psi_{\text{mijour}}$ ) sont les indicateurs les plus sensibles pour déceler un stress hydrique chez l'épinette noire, l'épinette blanche et le pin gris ([Buxton et al. 1985](#)). Couplés à des mesures des échanges gazeux, ils permettent de déterminer le statut hydrique des plants et d'estimer l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE). Les arbres qui ont une EUE élevée sont avantagés lorsque les ressources en eau sont limitées ([DeLucia et Schlesinger 1991; Cregg et Zhang 2001](#)). Ces variables physiologiques peuvent donc servir à valider la résistance aux stress hydriques de différents types de plants lors d'une sécheresse induite en milieu contrôlé, comme le montre le dispositif employé par [Lamhamedi et al. \(1996\)](#).

L'objectif de cette étude est de comparer la tolérance aux stress hydriques en conditions contrôlées de semis d'épinette noire produits en récipients 113-25 à celle de plants conventionnels (67-50, 45-110). Puisque le traitement de jours-courts est exigé pour les plants produits en récipient 113-25 ([MRNF 2008](#)), ce lot a été traité en jours-courts avant l'expérimentation. Nous avons aussi inclus dans notre dispositif à titre de témoin un lot de plants 113-25 qui n'a pas été traité pour évaluer l'incidence de ce



traitement sur la tolérance au stress hydrique. Le dispositif est similaire à celui utilisé antérieurement par [Walsh et Lord \(2012\)](#). Cependant nous avons ajouté un nouveau facteur soit la date de plantation. Au Saguenay-Lac-Saint-Jean, les plantations s'échelonnent de mai à septembre et les calendriers des producteurs sont construits pour fournir des lots de plants pour les différentes périodes de la saison de reboisement. Notre dispositif comprenait donc trois dates d'expérimentation: juin pour étudier les lots de plants devant se qualifier du 30 mai au 22 juin; juillet pour les lots de plants devant se qualifier du 23 juin au 20 juillet; août pour les lots de plants devant se qualifier du 21 juillet au 15 août.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### **Matériel végétal et conditions de culture**

Pour chaque date de reboisement, nous avons testé quatre types de lots d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill) BSP), 113JC, 113T, 67 et 45 qui ont été cultivés soit chez un producteur privé (Coopérative forestière de Girardville, Girardville, Qc.) soit dans une pépinière gouvernementale (Pépinière Normandin, Normandin, Qc). Les plants ont été cultivés dans trois type de récipient : 113-25, 67-50 et 45-110. Dans le cas des plants en 113-25, deux groupes ont été formés; un premier groupe dont les plants ont reçus un traitement de jours-courts de 15 jours (113JC) et un groupe témoin qui n'a pas reçu ce traitement (113T).

L'expérience se divisait en trois volets correspondant aux trois dates de livraison des plants;

- Juin : les plants utilisés ont été produits pour être reboisés normalement en juin; l'expérience a eu lieu entre le 16 juin et 11 juillet.
- Juillet : les plants utilisés ont été produits pour être reboisés normalement en juillet; l'expérience a eu lieu entre le 15 juillet et 14 août.
- Août : les plants utilisés ont été produits pour être reboisés normalement en août; l'expérience a eu lieu entre le 20 août et le 16 septembre.

Le calendrier de l'expérience est présenté à l'annexe 1. Le traitement de jours-courts d'une durée de 15 jours a eu lieu à partir du 26 mai simultanément pour les lots de plants 113JC de juin et juillet tandis que le lot de la plantation d'août a été traité à la mi-juin. Dans chaque lot, 20 semis ont été échantillonnés aléatoirement pour mesurer leurs caractéristiques morphologiques initiales (Annexe 2). Une période de récupération d'une semaine était allouée après

le stress hydrique. Les dernières mesures physiologiques et morphologiques ont été faites après cette période.

Le dispositif expérimental est similaire à celui utilisé par [Walsh et Lord \(2012\)](#). Cinq jours avant le traitement, les semis ont été transplantés dans des bacs (45 cm x 94 cm x 14 cm) remplis d'un sable de granulométrie moyenne. Les semis étaient plantés pour former 10 rangées de huit plants comprenant deux exemplaires de chaque lot placés aléatoirement dans chaque rangée. Une rangée de plants produits en récipient 67-50 a été plantée pour former une bordure autour des bacs. Au total, 10 bacs ont été utilisés formant cinq rangées de deux bacs, un servant de témoin et l'autre recevant le traitement de stress hydrique, la répartition des traitements ayant été faite aléatoirement dans chaque bloc de deux traitements. Les bacs ont été fertilisés une fois durant la première semaine de l'acclimatation, chacun recevant 10 g de N-P-K (20-20-20 Plant Products Ltd, Brampton, Ont., Canada). Les bacs étaient situés dans un tunnel recouvert d'un plastique de polyéthylène transparent équipé d'une ventilation forcée (consigne de ventilation à 25°C). Tous les bacs ont été arrosés à tous les deux jours pour maintenir une teneur en eau entre 15 et 18% (v/v). Les mesures de la teneur en eau du sol étaient réalisées quotidiennement dans chaque bac à l'aide d'une sonde TDR modèle MP-917 (E.S.I. Environmental Sensors Inc., Victoria, B.C., Can.) sauf en juillet où la sonde était en panne; des mesures gravimétrique de la teneur en eau du sol ont alors été utilisées. Le traitement de stress hydrique a été appliqué immédiatement après cette période d'acclimatation, les cinq bacs faisant partie de ce traitement n'ont pas été arrosés pendant 21 jours tandis que les bacs témoins étaient arrosés à tous les deux jours ( $12 \leq \theta_v \leq 20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Après cette période, les bacs du traitement de stress hydrique ont été arrosés d'une manière similaire aux bacs témoins pendant une semaine supplémentaire.

Les paramètres environnementaux ont été enregistrés continuellement durant la durée de l'expérience. La température (min/max) était mesurée tous les jours à l'aide d'un thermo-couple installé dans le tunnel à un m du sol. Le déficit de pression de vapeur (DPV) ainsi que l'humidité relative (HR) ont été enregistré au moment des mesures des échanges gazeux.

### **Potentiel hydrique et échanges gazeux**

Les mesures physiologiques ont été réalisées à six reprises durant la période de stress hydrique (jour 1, 3-4, 8, 11, 15

et 18) ainsi qu'à deux reprises après la réhydratation des bacs du traitement stress hydrique soit 22-23 et 25-26 jours après le début de l'expérience. Il n'y a pas eu de mesure des échanges gazeux le jour 1 de la plantation de juin suite à des problèmes techniques avec l'appareil LI-COR. À chaque date d'échantillonnage, un semis de chaque type de plant par ligne d'échantillonnage était sélectionné aléatoirement pour les mesures du potentiel hydrique préaube ( $\psi_{\text{préaube}}$ ), tandis que les quatre autres semis étaient choisis pour les mesures subséquentes du potentiel hydrique mi-jour ( $\psi_{\text{mijour}}$ ) et des mesures des échanges gazeux. La récolte et les mesures du potentiel hydrique suivent la description faite dans Hébert et al. (2006). Le  $\psi_{\text{préaube}}$  des 40 plants était mesuré en une heure environ à l'aide d'une chambre à pression (PMS Instruments Co., Corvallis, OR, USA) (Scholander et al. 1965). La mesure du  $\psi_{\text{mijour}}$  de même que les mesures des échanges gazeux ont été réalisés la même journée entre 09:00 et 11:00 h. Les plants d'un des bacs étaient déterrés et le système racinaire était placé immédiatement dans un sac de plastique. La photosynthèse nette ( $P_n$ ) et la conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{\text{ve}}$ ) ont été mesurées sans délai sur la pousse apicale à l'aide d'un appareil portatif de mesure de photosynthèse LI-6400 (LI-COR Inc., Lincoln, NB, USA.) équipé d'une chambre de 0,25 l. adaptée aux conifères. Les mesures ont été réalisées sous une lampe HPS fournissant un minimum de 1 200  $\mu\text{mole m}^{-2} \text{sec}^{-1}$  PAR au dessus de la chambre. Les conditions à l'intérieur de la chambre étaient de 400 ppm  $\text{CO}_2$  et d'environ 25°C. À la fin de ces mesures, le  $\psi_{\text{mijour}}$  était mesuré sans délai sur le même échantillon avec la chambre à pression. L'échantillon était ensuite séché à 65°C pendant 48 heures pour mesurer la biomasse foliaire incluse dans la chambre. Tous les paramètres des échanges gazeux ont été calculés sur la base de la masse sèche des aiguilles. L'efficacité d'utilisation de l'eau instantanée (EUE) a été calculée comme décrit dans DeLucia et Schlesinger (1991) :  $\text{EUE} = P_n / T$  où  $P_n$  est la photosynthèse nette ( $\mu\text{mole.g}^{-1} \text{sec}^{-1}$ ) et  $T$  la transpiration ( $\text{mmole.g}^{-1} \text{sec}^{-1}$ ).

### Croissance des plants

À la dernière date d'échantillonnage, après les mesures physiologiques, la motte de tourbe contenant le système racinaire a été sectionnée et la hauteur ainsi que le diamètre de la tige ont été mesurés. La longueur des deux plus longues racines ont alors été mesurées. Les biomasses sèches de la tige et des racines ont été déterminées séparément après le délavage des racines et un séchage à l'étuve à 65 °C pendant 48 h.

Les mesures du taux relatif de la croissance total ( $\text{TRC}_{\text{Total}}$ ) et racinaire ( $\text{TRC}_{\text{Racines}}$ ) étaient calculées par la méthode suivante :

$\text{TRC} = [\ln(\text{BS}_f) - \ln(\text{BS}_i)] / t$  (Hoffmann et Poorter 2002), où  $\text{BS}_f$  et  $\text{BS}_i$  sont les biomasses finales et initiales,  $t$  le nombre de jours entre les deux échantillonnages. Le TRC a été calculé pour la biomasse totale ainsi que pour la biomasse racinaire.

### Dispositif expérimental et analyses statistiques

Les trois expériences (juin, juillet, août) ont été analysées séparément. Les données de chaque expérience ont été analysées comme un dispositif en bloc en sous-parcelles subdivisées. Chaque bloc était composé des deux régimes hydriques, témoin irrigué et stress hydrique (Traitement (T)). Chaque bac de culture représentait une parcelle principale formée de huit sous-parcelles correspondant aux dates d'échantillonnage (Jour (J)), les quatre types de plant étant en sous-sous-parcelles (Récipient (R)). Au total, on retrouvait 5 blocs x 2 régimes hydriques x 8 dates d'échantillonnage x 4 types de semis = 320 plants pour les mesures du  $\psi_{\text{préaube}}$  et le même nombre pour le  $\psi_{\text{mijour}}$  et les mesures d'échanges gazeux. Les moyennes des variables physiologiques ont été comparées par l'analyse de variance (ANOVA) en utilisant la procédure REML du logiciel JMP 9.0.0 (2010, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). L'homogénéité des variances a été vérifiée graphiquement en évaluant la distribution des valeurs résiduelles du modèle linéaire en fonction des valeurs estimées (Montgomery 1991). La procédure «SLICE» a été appliquée aux interactions Jour x Récipient et Traitement x Jour x Récipient. Trois contrastes orthogonaux comparant les types de récipients ont été effectués aux dates où les régimes hydriques étaient significativement différents; 113 *versus* 1/2(67+45), 113JC *versus* 113T et 67 *versus* 45 (Kirk 1982).

## RÉSULTATS

### PLANTATION DE JUIN

L'annexe 2A présente les caractéristiques morphologiques des quatre types de plants au début de l'expérience. Les plants 113JC et 113T avaient sensiblement la même morphologie. Les plants 67 et 45 avaient pratiquement la même hauteur mais les plants 45 étaient plus imposants en diamètre et en biomasse et leur rapport biomasse aérien/ racines était plus bas. Les quatre types de plants étaient en croissance. La densité racinaire des plants 67 et 45 était le

double de celle des deux lots 113.

67 avaient en moyenne un  $\psi_{\text{préaube}}$  significativement plus bas que celui des autres types de plant (Tableau 1A; figure 1B).

La teneur en eau du sol des bacs du traitement stress hydrique a diminué linéairement dans le temps pour atteindre un minimum de 5% (Annexe 3A-A). La teneur en eau du sol des témoins s'est maintenue en moyenne autour de 15%. La température maximale était de 31 °C en moyenne et la température minimale autour de 14°C (Annexe 3A-B). Les températures étaient plus élevées le dernier tiers de l'expérience avec un pic de 46 °C au jour 20 de l'expérience (Annexe 3A-C). Cette période coïncidait avec une forte augmentation du DPV au jour 22 de l'expérience tandis que HR demeurait assez stable variant entre 50 et 70%.

Potentiel hydrique

La diminution de la teneur en eau du sol du traitement de stress hydrique a provoqué une différence significative du  $\psi_{\text{préaube}}$  des plants (Tableau 1A). Le  $\psi_{\text{préaube}}$  des plants stressés était significativement plus négatif que celui des plants témoins à partir du jour 11 jusqu'au jour 22 de l'expérience (Tableau 1A; figure 1A). Il a descendu jusqu'à -1,12 MPa après 22 jours de sécheresse. Le  $\psi_{\text{préaube}}$  des plants stressés ne se distinguait plus de celui des plants témoins après l'arrosage de toutes les parcelles au jour 21 et tous les plants recouvraient un  $\psi_{\text{préaube}}$  similaire à ce qu'il était au début de l'expérience. Règle générale, les plants

Le  $\psi_{\text{mijour}}$  des plants témoins a diminué linéairement dans le temps pour atteindre 0,23 MPa à la fin de l'expérience (Figure 1C). Le  $\psi_{\text{mijour}}$  des plants stressés était significativement plus bas que celui des plants témoins durant toute la période de sécheresse (Tableau 1A; figure 1C). Il était plus bas de 0,3 MPa à la fin de la période de récupération comparativement au  $\psi_{\text{mijour}}$  au début de l'expérience. En moyenne, le  $\psi_{\text{mijour}}$  des plants 113T était significativement plus bas que les trois autres types de plant (Figure 1D). Les interactions J x R et T x R x J étaient significatives (Tableau 1A) et seule cette dernière<sup>1</sup> est représentée graphiquement (Figure 1E). À l'intérieur du traitement de stress hydrique, le  $\psi_{\text{mijour}}$  étaient significativement différent entre les types de plant durant la période de stress mais aussi durant la période de récupération (Tableau 1A; figure 1E). Le  $\psi_{\text{mijour}}$  des plants 45 était plus bas que celui des autres types de plant au début du stress hydrique jusqu'au jour 15 mais plus élevé par la suite. À la fin de la période de récupération, le  $\psi_{\text{mijour}}$  des deux lots de plants 113 était significativement plus bas que celui des plants 67 et 45 et celui des 113JC plus bas que celui des 113T (Tableau 1B; figure 1E).

Tableau 1. Sommaire de l'ANOVA du potentiel hydrique préaube ( $\psi_{\text{préaube}}$ ) et du potentiel hydrique à mijour ( $\psi_{\text{mijour}}$ ) de l'expérience juin (A). Valeurs de *P* des contrastes entre les différents types de plant du traitement de stress hydrique de l'interaction T x J x R (B).

A-)								
Source	d.l. num.	$\Psi_{\text{préaube}}$			d.l. dén.	$\Psi_{\text{mijour}}$		
		d.l. dén.	F	P		F	P	
Bloc (B)	4	4	0,43	-	4	0,70	-	
Traitement (T)	1	4	70,64	<b>0,0011</b>	4	46,10	<b>0,0024</b>	
Jour (J)	7	56	13,64	<b>&lt;0,0001</b>	56	27,75	<b>&lt;0,0001</b>	
T x J	7	56	12,71	<b>&lt;0,0001</b>	56	2,15	0,0532	
Récipient (R)	3	190	3,94	<b>0,0093</b>	188	3,22	<b>0,0239</b>	
T x R	3	190	0,69	0,5605	188	1,41	0,2418	
J x R	21	190	0,93	0,5541	188	2,26	<b>0,0017</b>	
T x J x R	21	190	1,04	0,4194	188	2,79	<b>0,0001</b>	
B-)								
$\Psi_{\text{mijour}}$								
	Jour 1	Jour 4	Jour 8	Jour 11	Jour 15	Jour 18	Jour 22	Jour 26
T x J x R (Stress)								
113 vs 67-45	0,5664	0,3519	0,8297	0,5190	<b>0,0387</b>	<b>0,0283</b>	0,0627	<b>&lt;0,0001</b>
113JC vs 113T	0,5431	0,9192	1,0000	0,6851	0,6123	<b>0,0491</b>	0,4125	<b>0,0343</b>
67 vs 45	0,1059	0,4177	0,4781	0,4781	0,0692	0,3620	0,1059	0,4177

1                   seulement les courbes des plants stressés



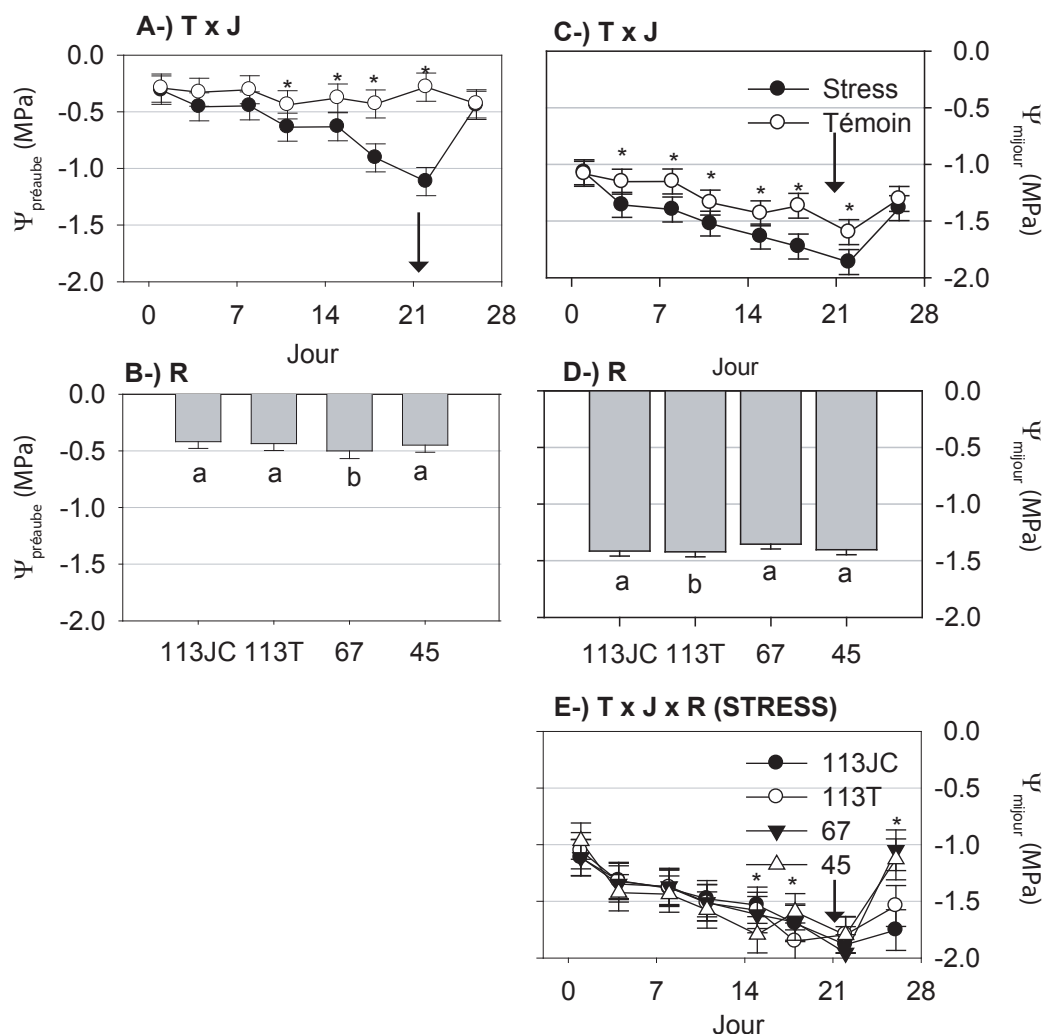


Figure 1. Potentiel hydrique préaube ( $\Psi_{\text{préaube}}$ ) de l'expérience juin en fonction de l'interaction T x J (A) et des types de plant R (B). Potentiel hydrique à mijour ( $\Psi_{\text{mijour}}$ ) de l'expérience juin en fonction de l'interaction T x J (C), des types de plant R (D) et de l'interaction T x J x R (E). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes ou de \* sont significativement différentes à  $P < 0,05$ . La flèche indique la fin du traitement de stress hydrique.

### Échanges gazeux

La figure 2 représente la relation entre DPV et  $g_{\text{ve}}$ . DPV a influencé négativement ( $r^2 = 0,41$ )  $g_{\text{ve}}$  pour les quatre types de plant dans le traitement témoin où le  $\Psi_{\text{préaube}}$  n'est pas descendu plus bas que -0,5 MPA.

Les analyses de variance des variables mesurant les échanges gazeux sont présentées au tableau 2. Les valeurs de  $P_n$  des plants témoins oscillaient autour de  $0,12 \mu\text{mole.g}^{-1}.\text{sec}^{-1}$  sauf au jour 22 où cette valeur est descendue à  $0,5 \mu\text{mole.g}^{-1}.\text{sec}^{-1}$  (Figure 3A). Cette mesure coïncidait avec le pic du DPV (Annexe 3A-C). Les valeurs de  $P_n$  des plants stressés étaient significativement plus faibles que celle des plants témoins durant toute la période du traitement de stress hydrique (Tableau 2). Les valeurs de  $P_n$  ont diminué linéairement la première semaine de la sécheresse pour se stabiliser par la suite et redescendre et devenir indétectables

au jour 22. Le taux de photosynthèse des plants stressés est remonté à un niveau comparable aux plants témoins à la fin de la période de récupération (Figure 3A). En moyenne, les valeurs de  $P_n$  des plants 113JC étaient significativement plus élevées, suivi des plants 113T.

Le traitement de stress hydrique a fait diminuer significativement  $g_{\text{ve}}$  durant toute cette période ainsi que durant la période de récupération (Tableau 2; figure 3C). La valeur de  $g_{\text{ve}}$  était à son plus bas niveau après 22 jours de traitement. L'interaction T x R était significative; les valeurs de  $g_{\text{ve}}$  des plants 113JC et 113T étaient significativement plus élevées que celles des plants 67 et 45 et cette différence était plus grande encore dans le traitement témoin (Figure 3D).

Le traitement de stress hydrique n'a pas eu d'effet significatif

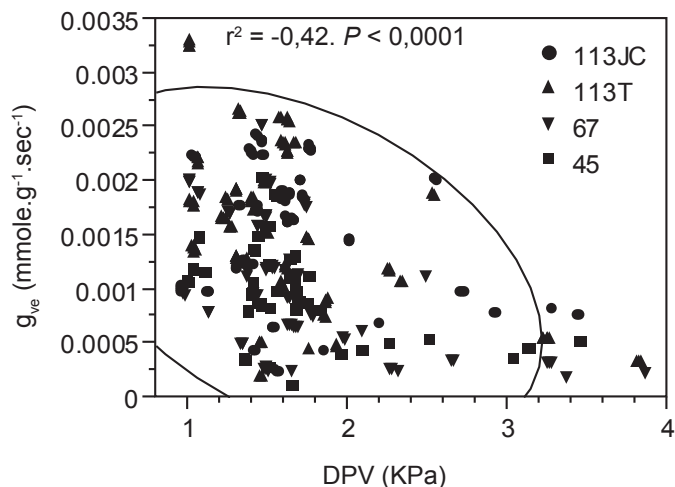


Figure 2. Influence du DPV sur  $g_{ve}$  chez les plants témoins de l'expérience juin. Ellipse normale bivariée  $P = 0,95$ .

sur EUE (Tableau 2). Par contre EUE a varié significativement dans le temps, atteignant un pic au jour 11 pour diminuer par la suite (Figure 3E). L'interaction  $T \times R$  était significative. En moyenne, les valeurs de EUE des plants 67 et 45 du traitement témoin étaient significativement plus élevées que celle des plants 113; dans le traitement stress par contre, les valeurs de EUE des plants 45 étaient significativement plus basses que les trois autres types de plants (Figure 2F).

### Croissance

Le stress hydrique a inhibé la croissance des racines hors de la motte de tourbe (Moyenne des deux plus longues racines; Tableau 3A). En moyenne, les plus longues racines des plants stressés mesuraient 21 mm comparativement à 47 mm pour les plants témoins. Le stress hydrique n'a cependant pas influencé le rapport biomasse épigée sur biomasse racinaire qui était en moyenne de 3,1  $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ . Ce rapport était significativement plus élevé chez les plants 113T et significativement plus bas chez les plants 45 (Tableau 3B). Le taux relatif de croissance ( $\text{TRC}_{\text{Total}}$ ) de la biomasse sèche

totale a été réduit significativement par le traitement de stress hydrique (Tableau 3A). Le  $\text{TRC}_{\text{Total}}$  des plants 113JC était plus élevé que les trois autres types de plant tandis que le  $\text{TRC}_{\text{Total}}$  des plants 45 était significativement plus bas (Tableau 3B). Le  $\text{TRC}_{\text{Racines}}$  était nettement plus faible chez les plants stressés, 0,008  $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{jour}^{-1}$  comparativement à 0,015  $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{jour}^{-1}$ , une diminution de 47% (Tableau 3A-3B). Le  $\text{TRC}_{\text{Racines}}$  était plus élevé chez les plants 113-JC suivi des plants 113-Témoin et 67 et des plants 45 qui avaient le  $\text{TRC}_{\text{Racines}}$  le plus bas (Tableau 3B).

Un faible taux de mortalité était présent uniquement sur les lots 113JC et 113T. Cette mortalité est apparue après 19 jours de sécheresse. Calculé sur le nombre de plants résiduels, le taux de mortalité des 113T était de 6% et celle des 113JC de 3%. On a aussi évalué le niveau de dommage foliaire sur les plants résiduels du traitement de stress hydrique (Tableau 4); 10% des plants 113T montraient des dommages foliaires élevés ( $D. f. > 50\%$ ) à la fin du traitement (Tableau 4). Le stress a aussi eu un impact important sur les plants 45 puisque 50% de ceux-ci présentaient des dommages foliaires modérés ( $11 < d.f. < 30$ ) (Figure 4). L'analyse de contingence effectuée sur les plants du traitement de stress hydrique n'était pas concluante puisque que plus de 20 % des cellules classe de dommage  $\times$  types de plants avaient moins de 5 dénombrements ( $N = 40$ , d.l. = 9,  $\chi^2 = 13,1$ ,  $P = 0,1564$ ).

### PLANTATION EN JUILLET

Le tableau de l'annexe 2B présente les caractéristiques morphologiques des plants au début de l'expérience. Les plants 113-JC mesuraient deux cm de moins que les plants 113T et leur système racinaire était plus développé comparativement aux autres types de plant. Les deux types de

Tableau 2. Sommaire de l'ANOVA de la photosynthèse nette ( $P_n$ ), de la conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{ve}$ ) et de l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) de l'expérience juin.

Source	Photosynthèse ( $P_n$ )				Conductance ( $g_{ve}$ )			Efficacité d'utilisation de l'eau (EUE)		
	d.l. num.	d.l. dén.	F	P	d.l. dén.	F	P	d.l. dén.	F	P
Bloc (B)	4	4	12,12	-	4	3,80	-	4	1,35	-
Traitement (T)	1	4	245,23	<b>&lt;0,0001</b>	4	82,39	<b>0,0008</b>	4	0,42	0,5534
Jour (J)	6	48	28,54	<b>&lt;0,0001</b>	47	24,78	<b>&lt;0,0001</b>	48	7,46	<b>&lt;0,0001</b>
T $\times$ J	6	48	4,64	<b>0,0009</b>	47	6,24	<b>&lt;0,0001</b>	48	0,90	0,5022
Réc. (R)	3	165	37,07	<b>&lt;0,0001</b>	164	33,08	<b>&lt;0,0001</b>	163	1,87	0,1364
T $\times$ R	3	165	1,34	0,2622	164	7,22	<b>0,0001</b>	163	3,78	<b>0,0118</b>
J $\times$ R	18	165	0,98	0,4883	164	1,08	0,3805	163	0,55	0,9313
T $\times$ J $\times$ R	18	165	1,22	0,2502	164	1,33	0,1724	163	0,89	0,5923

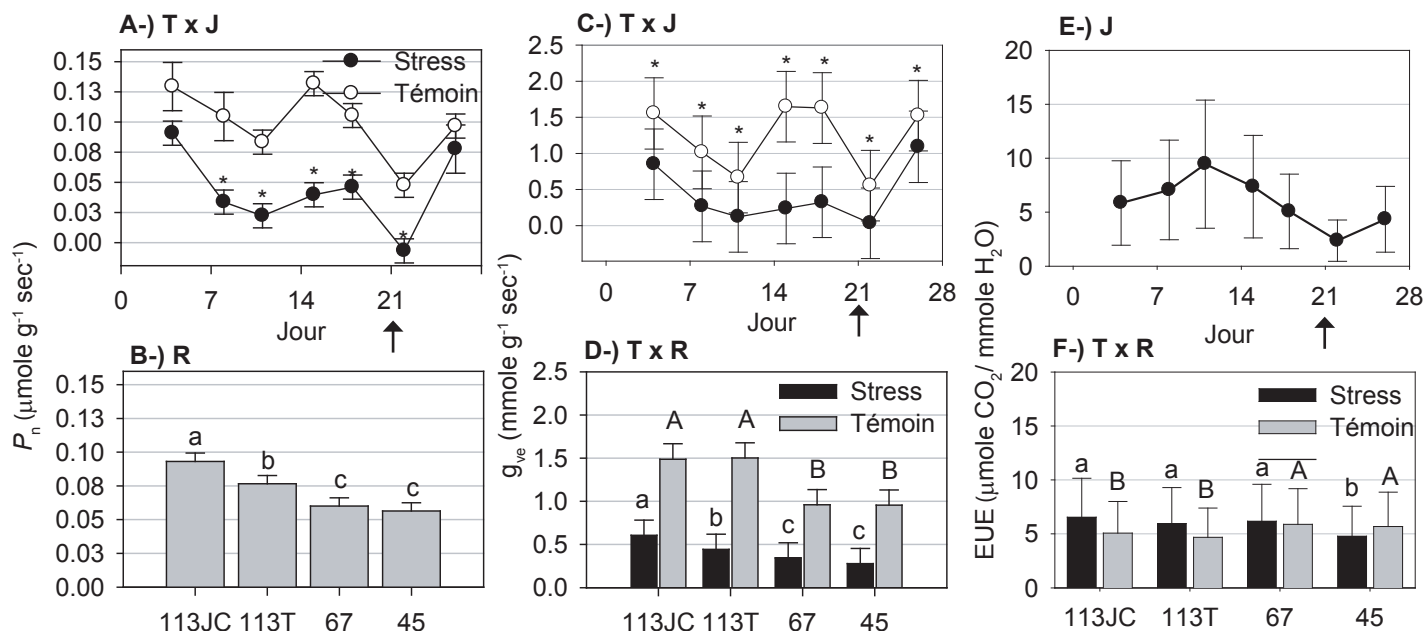


Figure 3. Photosynthèse nette ( $P_n$ ) de l'expérience juin en fonction de l'interaction T x J (A) et des types de plant R (B). Conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{ve}$ ) de l'expérience juin en fonction de l'interaction T x J (C) et de l'interaction T x R (D). Efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE) de l'expérience juin en fonction des jours J (E) et de l'interaction T x R (F). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes ou de \* sont significativement différentes à  $P < 0,05$  (En D et F, stress et témoin sont analysés séparément). la flèche indique la fin du traitement de stress hydrique.

Tableau 3. Sommaire de l'ANOVA de la longueur des deux plus longues racines, du rapport biomasse tige/racines, du taux relatif de croissance total ( $TRC_{Total}$ ) ainsi que du taux relatif de croissance de la biomasse racinaire ( $TRC_{Racines}$ ) à la fin de l'expérience juin (A). Moyennes et intervalles de confiance à 95% (I.C. 95%) des paramètres de croissance mesurés à la fin de l'expérience juin (B). Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes à  $P \leq 0,05$ .

A-)

Source	d.l. num	d.l. dén.	Longueur des racines		Biomasse tige/racines		TRC <sub>Total</sub>		TRC <sub>Racines</sub>	
			F	P	F	P	F	P	F	P
Bloc (B)	4	4	10,76	-	1,06	-	1,75	-	2,12	-
Traitement (T)	1	4	132,30	<b>0,0002</b>	0,06	0,8184	34,14	<b>0,0043</b>	10,29	<b>0,0326</b>
Réc. (R)	3	24	0,95	0,4307	7,12	<b>0,0014</b>	16,04	<b>&lt;0,0001</b>	19,55	<b>&lt;0,0001</b>
T x R	3	24	0,95	0,4327	0,09	0,9631	2,96	<b>0,0526</b>	1,54	0,2303

B-)

Plants	Biomasse tige/rac. (mg/mg)	TRC <sub>Total</sub> (mg/mg jour)		TRC <sub>Racines</sub> (mg/mg jour)	
	Stress& Témoin	Stress	Témoin	Stress	Témoin
113JC	2,9b	0,0210a	0,0278a	0,0173a	0,0230a
113T	3,8a	0,0139b	0,0264b	0,0075b	0,0201b
67	3,0b	0,0172b	0,0268b	0,0068b	0,0152b
45	2,6b	0,0116c	0,0141c	-0,0005c	0,0011c
I.C. 95%	0.44	0.0074		0.0115	

plants 113 avaient sensiblement le même gabarit que les plants 67 pour tous les critères morphologiques mesurés. 95% des plants 113JC étaient en dormance.

La teneur en eau du sol a diminué linéairement durant le traitement de stress hydrique jusqu'à atteindre sa valeur la plus basse entre les 14<sup>ème</sup> et 21<sup>ème</sup> jours du

traitement (Annexe 3B-A). La température maximale a oscillée entre 25 et 40 °C durant toute cette période en fonction de l'ensoleillement extérieur (Annexe 3B-B). En moyenne, la température maximale était de 33 °C tandis que la température moyenne minimale était de 16 °C. On remarque une brusque augmentation du DPV après 8 jours de traitement de sécheresse (Annexe 3B-C).

Tableau 4. Pourcentage de dommages foliaires des plants du traitement de stress hydrique à la fin de l'expérience juin.

	Dommages foliaires (%)			
	0-10	11-20	21-30	> 50
113JC	90	10	0	0
113T	90	0	0	10
67	80	10	10	0
45	50	30	20	0

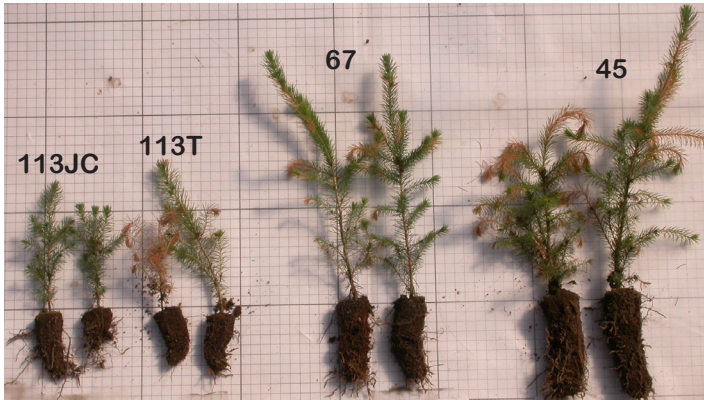


Figure 4. Dommages foliaires observés sur les plants du traitement de stress hydrique de l'expérience juin.

### Potentiel hydrique

Le traitement de stress hydrique a fait diminuer significativement et d'une manière linéaire le  $\psi_{\text{préaube}}$  (Tableau 5; figure 5A). Les valeurs les plus basses ont été atteintes au jour 22 du traitement; la valeur de  $\psi_{\text{préaube}}$  des plants stressés était de -1,3 MPa après trois semaines de traitement. Après une semaine de récupération, le  $\psi_{\text{préaube}}$  des plants stressés ne se différenciait plus de celui des plants témoins. Les plants 67 et 45 avaient en moyenne un  $\psi_{\text{préaube}}$  plus bas que celui des deux lots de plants 113 (Figure 5B).

Après une semaine de traitement, le  $\psi_{\text{mijour}}$  des plants stressés était lui aussi significativement plus bas que celui des plants témoins (Tableau 5; figure 5C). Le point le plus bas a été atteint après trois semaines de traitement soit -1,9 MPa. Par contre, le  $\psi_{\text{mijour}}$  s'est corrigé durant la période de récupération et ne se distinguait plus de celui des plants témoins au jour 25 de l'expérience. L'interaction T x R était significative puisque l'écart entre les plants témoins et stressés augmentait en fonction de la taille des plants (113JC < 113T < 67 < 45) (Figure 5D).

### Échanges gazeux

Les analyses de variance des échanges gazeux de l'expérience juillet sont présentées au tableau 6A et 6B. Le stress hydrique a causé une diminution significative de

$P_n$  pour tous les types de plants à partir de la 4<sup>ème</sup> journée du traitement (Figure 6A).  $P_n$  a atteint son point le plus bas après 18 jours de stress, soit 0,015  $\mu\text{mole.g}^{-1}.\text{sec}^{-1}$ . Par contre,  $P_n$  s'est redressée durant la période de récupération (jour 25) sans atteindre cependant le même niveau que celui des plants témoins. En moyenne, les plants 113-JC avaient une valeur de  $P_n$  significativement plus élevée que celles des trois autres types de plant (Figure 6B). Les interactions J x R et T x J x R étaient significatives (Tableau 6A); les valeurs de  $P_n$  des 113T étaient significativement plus basses que celles des plants 113JC aux jours 1, 4, 8, 15 et 25 de l'expérience (Tableau 6B; figure 5C). À la fin de l'expérience, après la période de récupération (Jour 25),  $P_n$  des plants 113T est significativement plus basse que les trois autres types de plants (Tableau 6B; figure 6C).

Le stress hydrique a causé une diminution significative de  $g_{ve}$  (Tableau 6A; figure 6D). Après la période de récupération cependant,  $g_{ve}$  a remonté au même niveau que les plants témoins. Le stress hydrique a affecté tous les types de plants sauf que l'écart entre les valeurs des plants stressés et témoins étaient plus importants dans le cas des plants 113JC (113JC > 113T > 67 > 45) (Figure 6E). L'interaction T x J x R était significative et s'explique par des écarts significatifs entre les types de plant aux jours 1, 15 et 25 de l'expérience (Tableau 6B; figure 6F). Pour ces trois mesures,  $g_{ve}$  des plants 113T était significativement plus basse comparativement aux trois autres types de plants. Les plants 113T n'ont pas récupéré complètement et la valeur de  $g_{ve}$  était significativement plus basse que celle des plants 113JC (Tableau 6B; figure 6F).

Le stress hydrique a influencé significativement les valeurs de EUE aux jours 8, 15 et 18 du traitement (Tableau 5G; figure 6G). Les valeurs de EUE ont augmenté rapidement durant le stress hydrique à partir du jour 8 du traitement pour diminuer à la fin de celui-ci et se stabiliser autour des valeurs des plants témoins. L'interaction T x R était significative (Tableau 6A; figure 6H); l'écart entre les valeurs des plants témoins et stressés était plus important pour les plants 113 comparativement aux plants 67 et 45. Dans le traitement de stress hydrique, les valeurs de EUE différaient significativement entre les types de plant les jours 8, 18 et 22 (Figure 6I). À la fin de la période de stress hydrique (jour 18), les plants 113T avait les valeurs de EUE les plus élevées (Tableau 6B).

Tableau 5. Sommaire de l'ANOVA du potentiel hydrique préaube ( $\psi_{\text{préaube}}$ ) et du potentiel hydrique à mijour ( $\psi_{\text{mijour}}$ ) de l'expérience juillet.

Source	d.l. num.	d.l. dén.	$\psi_{\text{préaube}}$		d.l. dén.	$\psi_{\text{mi-jour}}$	
			F	P		F	P
Bloc (B)	4	4	1,00	-	4	1,09	-
Traitement (T)	1	4	82,93	<b>0,0008</b>	4	95,96	<b>0,0006</b>
Jour (J)	7	56	19,96	<b>&lt;0,0001</b>	56	24,43	<b>&lt;0,0001</b>
T x J	7	56	13,32	<b>&lt;0,0001</b>	56	18,04	<b>&lt;0,0001</b>
Réc. (R)	3	191	5,50	<b>0,0012</b>	192	18,95	<b>&lt;0,0001</b>
T x R	3	191	1,71	0,1673	192	3,59	<b>0,0148</b>
J x R	21	191	1,03	0,4311	192	1,61	0,0505
T x J x R	21	191	0,96	0,5200	192	1,21	0,2501

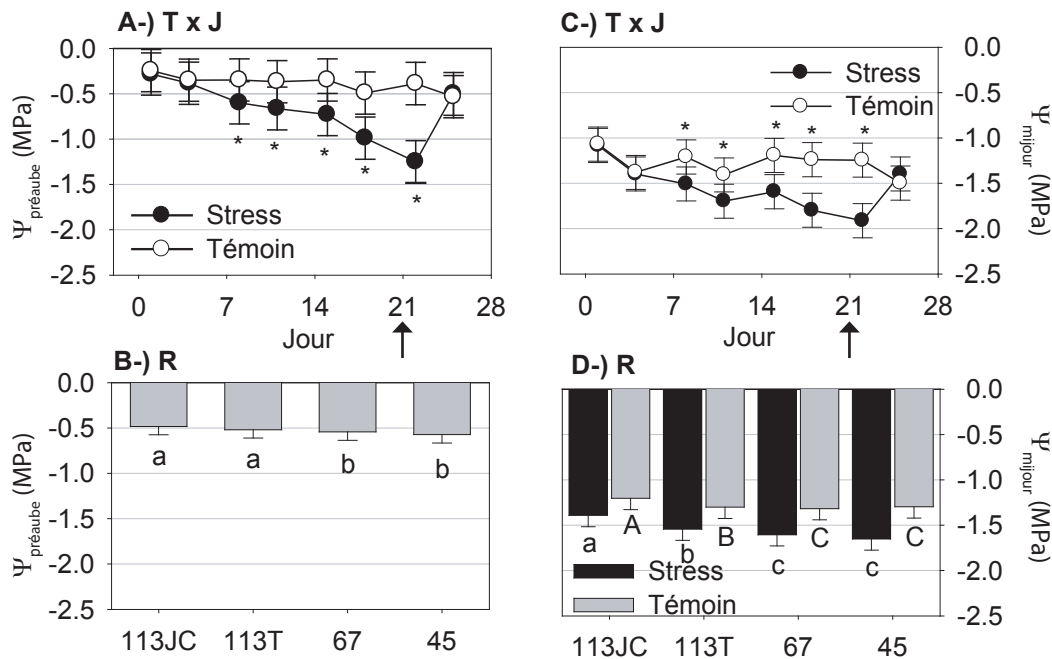


Figure 5. Potentiel hydrique préaube ( $\psi_{\text{préaube}}$ ) de l'expérience juillet en fonction de l'interaction T x J (A) et des types de plant R (B). Potentiel hydrique à mijour ( $\psi_{\text{mijour}}$ ) de l'expérience juillet en fonction de l'interaction T x J (C) et T x R (D). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes ou de \* sont significativement différentes à  $P < 0,05$  (En D, stress et témoin sont analysés séparément). La flèche indique la fin du traitement de stress hydrique.

### Croissance

Le traitement de stress hydrique a inhibé significativement l'allongement des racines à l'extérieur de la motte de tourbe (Tableau 7A-7B). Les plants 45 avaient les plus longues racines soit 23,2 mm dans le traitement de stress hydrique comparativement à 42,5 mm dans le traitement témoin. Cependant, le traitement de stress hydrique n'a pas modifié la répartition de la biomasse entre la tige et les racines (Tableau 7A). Ce rapport était significativement plus bas chez les plants 45 comparativement aux trois autres types de plant (Tableau 7B). Le taux relatif de croissance de la biomasse sèche totale ( $\text{TRC}_{\text{Total}}$ ) n'a pas été influencé par le traitement de stress hydrique (Tableau 7A). Le  $\text{TRC}_{\text{Total}}$

des plants 113T était significativement plus bas que les trois autres types de plants (Tableaux 7B). Le taux relatif de croissance de la biomasse sèche des racines ( $\text{TRC}_{\text{Racines}}$ ) n'a pas été influencé lui aussi par le traitement de stress hydrique (Tableau 7A). Les plants 113T avaient un  $\text{TRC}_{\text{Racines}}$  significativement plus bas que les trois autres types de plants (Tableaux 7B).

Le traitement de stress hydrique n'a pas causé d'augmentation significative du dommages aux aiguilles des plants ( $\chi^2 = 1,1$ ;  $P = 0,2945$ ); 7,5% des plants du traitement stress présentaient des dommages légers ( $< 10\%$  des aiguilles) comparativement à 2,5% pour les plants



Tableau 6. Sommaire de l'ANOVA de la photosynthèse nette ( $P_n$ ), de la conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{ve}$ ) et de l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) de l'expérience juillet (A). Valeurs de  $P$  des contrastes entre les types de plant du traitement de stress hydrique de l'interaction T x R x J (B).

A-)

Source	d.l. num.	Photosynthèse ( $P_n$ )			Conductance ( $g_{ve}$ )			Efficacité d'utilisation de l'eau (EUE)		
		d.l. dén.	F	P	d.l. dén.	F	P	d.l. dén.	F	P
Bloc (B)	4	4	6,62	-	4	3,81	-	4	8,90	-
Traitement (T)	1	4	243,27	<b>&lt;0,0001</b>	4	59,67	<b>0,0015</b>	4	3,78	0,1234
Jour (J)	7	56	16,19	<b>&lt;0,0001</b>	56	8,59	<b>&lt;0,0001</b>	56	35,99	<b>&lt;0,0001</b>
T x J	7	56	10,20	<b>&lt;0,0001</b>	56	7,08	<b>&lt;0,0001</b>	56	3,09	<b>0,0081</b>
Réc. (R)	3	191	41,05	<b>&lt;0,0001</b>	190	35,35	<b>&lt;0,0001</b>	187	2,80	<b>0,0413</b>
T x R	3	191	2,17	0,0927	190	9,45	<b>&lt;0,0001</b>	187	3,51	<b>0,0163</b>
J x R	21	191	2,02	<b>0,0072</b>	190	1,44	0,1024	187	1,63	<b>0,0456</b>
T x J x R	21	191	2,49	<b>0,0006</b>	190	1,66	<b>0,0408</b>	187	1,43	0,1087

B-)

	Jour 1	Jour 4	Jour 8	Jour 11	Jour 15	Jour 18	Jour 22	Jour 25
<b>Photosynthèse (<math>P_n</math>) T x J x R (Stress)</b>								
Stress x 113 vs 67-45	0,1412	0,8663	<b>0,0016</b>	0,4614	0,3265	0,2589	0,7707	0,2534
Stress x 113JC vs 113T	<b>&lt; 0,0001</b>	<b>0,0005</b>	<b>0,0158</b>	0,5422	<b>0,0024</b>	0,4646	0,6383	<b>0,0001</b>
Stress x 67 vs 45	0,6449	0,1856	0,8965	0,9622	0,8755	0,4671	0,1972	0,4394
<b>Conductance (<math>g_{ve}</math>) T x J x R (Stress)</b>								
Stress x 113 vs 67-45	0,3097	0,6967	0,0819	0,6604	0,2611	0,7361	0,9126	0,9674
Stress x 113JC vs 113T	<b>0,0031</b>	0,2305	0,4451	0,8691	<b>0,0325</b>	0,9559	0,7899	<b>0,0021</b>
Stress x 67 vs 45	0,7169	0,1958	0,7353	0,8779	0,9319	0,7638	0,7699	0,9920
<b>Efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) J x R</b>								
113 vs 67-45	0,1033	0,5752	0,0645	0,7101	<b>0,0124</b>	0,2292	0,4609	0,2724
113JC vs 113T	0,9879	0,8723	0,2112	0,4937	0,9309	<b>0,0014</b>	0,5577	0,4995
67 vs 45	0,7301	0,2577	0,7177	0,9331	0,4285	0,3254	<b>0,0019</b>	0,4417

témoins. Les différents types de plants étaient affecté de la même manière ( $\chi^2 = 1,8$ ;  $P = 0,6137$ ).

## PLANTATION EN AOÛT

Les plants 113JC utilisés dans cette expérience étaient nettement plus petits que les 113T (Annexe 2-C). Le rapport biomasse tige/racines des premiers était nettement plus bas que ces derniers et était comparable aux plus gros plants de cette expérience, les 45. Les plants 113T et 67 avaient sensiblement la même taille même si les premiers étaient plus petits en termes de diamètre de la tige et de la biomasse. La majorité des plants, à l'exception des 113T, étaient aoûtés au début de l'expérience.

L'arrêt de l'arrosage dans les bacs du traitement stress a permis de créer un différentiel dans la teneur en eau du sol à partir de la 11<sup>ème</sup> journée du traitement (Annexe 3C-A). La teneur en eau du sol s'est alors maintenue autour de 10% comparativement à 19% pour les bacs témoins. On remarque deux périodes distinctes, une période plus chaude dans la première moitié de l'expérience où la température

maximale oscillait autour de 35 °C et une deuxième où cette température était en moyenne de 22 °C (Annexe 3C-B). Le déficit de pression de vapeur (DPV) était assez stable tandis que l'humidité relative (HR) a diminué très légèrement tout au long de l'expérience (Annexe 3C-C).

## Potentiel hydrique

Le traitement de stress hydrique a provoqué une diminution progressive et significative du  $\Psi_{\text{préaube}}$  (Tableau 8A). Le  $\Psi_{\text{préaube}}$  le plus bas a été atteint après 15 jours de stress hydrique soit une valeur de -1,0 MPa (Figure 7A). Après la période de récupération (jour 26), le  $\Psi_{\text{préaube}}$  des plants stressés a augmenté (moins négatif) au même niveau que celui des plants témoins. En moyenne durant cette période, les plants 45 avaient un  $\Psi_{\text{préaube}}$  significativement plus bas que celui des autres types de plant (Figure 7B).

Le  $\Psi_{\text{mijour}}$  a aussi diminué progressivement au cours de la période de traitement pour atteindre une valeur minimale de -1,9 MPa après 18 jours de sécheresse (Tableau 8A; figure 7C). Tout comme le  $\Psi_{\text{préaube}}$ , le  $\Psi_{\text{mijour}}$  des plants n'était pas

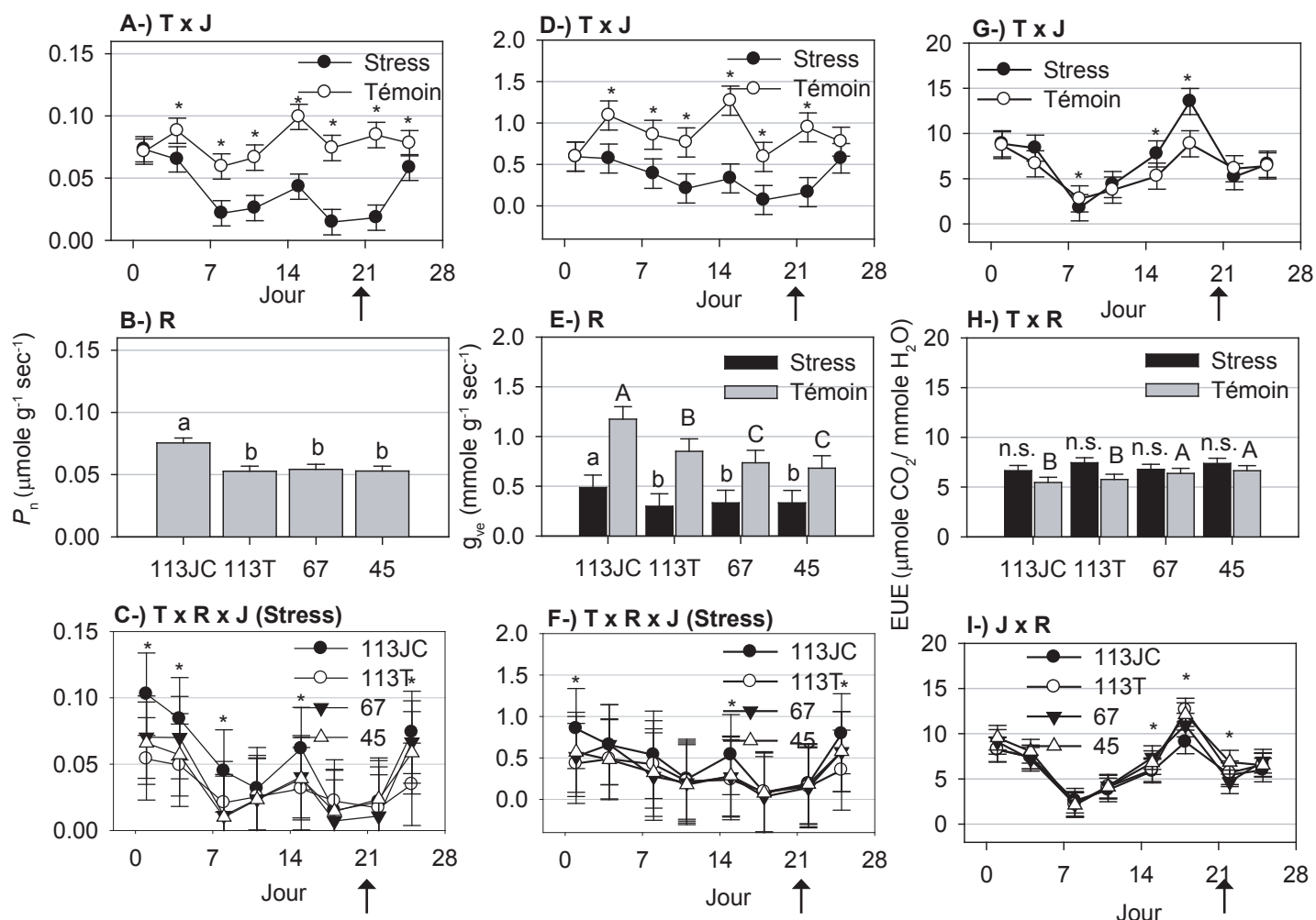


Figure 6. Photosynthèse nette ( $P_n$ ) de l'expérience juillet en fonction de l'interaction T x J (A), des types de plant R (B) et de l'interaction T x R x J (C). Conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{ve}$ ) de l'expérience juillet en fonction de l'interaction T x J (D), T x R (E) et T x R x J (F). Efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE) de l'expérience juillet en fonction de l'interaction T x J (G), T x R (H) et T x R x J (I). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes ou de \* sont significativement différentes à  $P < 0,05$  (En E et H, stress et témoin sont analysés séparément); n.s. non-significatif à  $P < 0,05$ . La flèche indique la fin du traitement de stress hydrique.

significativement différent de celui des plants témoins après la période de récupération. En moyenne, les plants 113T et 45 avaient un  $\Psi_{mijour}$  légèrement plus bas que celui des deux autres types de plants (Figure 7D). Des différences significatives entre les différents types de plants stressés n'étaient présentes qu'entre la 3<sup>ème</sup> et la 15<sup>ème</sup> journée du traitement (Tableau 8B; figure 7E). En moyenne, le  $\Psi_{mijour}$  des plants 113 était moins négatif que celui des 67 et des 45 et le  $\Psi_{mijour}$  des 113JC était moins négatif que celui des 113T (Tableau 8B). À la fin de la période de récupération, le  $\Psi_{mijour}$  des plants 113T qui ont subi le stress hydrique était significativement plus bas que celui des plants 113JC (Tableau 8B; figure 7E).

### Échanges gazeux

Les analyses de variance des échanges gazeux pour

l'expérience août sont présentées au tableau 9. Les valeurs de  $P_n$  étaient significativement différentes entre les deux traitements. Le traitement de stress hydrique a fait diminuer le niveau de  $P_n$  mais ces écarts n'étaient significatifs qu'à la 15<sup>ème</sup> et 18<sup>ème</sup> journée du traitement (Figure 8A). En moyenne,  $P_n$  était significativement plus élevée chez les plants 113JC comparativement aux autres types de plant (Figure 8B). Le traitement de stress hydrique a aussi fait diminuer les valeurs de  $g_{ve}$  (Tableau 9). Les valeurs de  $g_{ve}$  étaient significativement plus basses à partir de la 4<sup>ème</sup> journée du traitement ainsi que durant la période de récupération (Figure 8C). En moyenne, les valeurs de  $g_{ve}$  étaient significativement plus élevées chez les plants 113JC comparativement aux trois autres types de plant (Figure 8D).

L'efficacité photosynthétique d'utilisation de l'eau (EUE) a été influencée par le traitement de stress hydrique

Tableau 7. Sommaire de l'ANOVA de la longueur des deux plus longues racines, du rapport biomasse tige/racines, du taux relatif de croissance total (TRC<sub>Total</sub>) ainsi que du taux relatif de croissance de la biomasse racinaire (TRC<sub>Racines</sub>) à la fin de l'expérience juillet (A). Moyennes et intervalles de confiance à 95% (I.C. 95%) des paramètres de croissance mesurés à la fin de l'expérience juillet (B). Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes à  $P \leq 0,05$ .

A-)

Source	d.l. num.	d.l. dén.	Longueur des racines		Biomasse tige/racines		TRC <sub>Total</sub>		TRC <sub>Racines</sub>	
			F	P	F	P	F	P	F	P
Bloc (B)	4	4	0,89	-	0,77	-	1,18	-	1,05	-
Traitement (T)	1	4	11,44	<b>0,0277</b>	0,16	0,7112	2,05	0,2255	0,43	0,5500
Réc. (R)	3	24	6,15	<b>0,0030</b>	8,90	<b>0,0004</b>	16,75	<b>&lt;0,0001</b>	8,72	<b>0,0004</b>
T x R	3	24	0,70	0,5624	0,04	0,9884	0,29	0,8352	0,13	0,9416

B-)

Plants	Longueur des racines (mm)		Biomasse tige/rac. (mg/mg)		TRC <sub>Total</sub> (mg/mg jour)		TRC <sub>Racines</sub> (mg/mg jour)	
	Stress	Témoin	Stress & Témoin		Stress & Témoin		Stress & Témoin	
113JC	11,3b	24,3b	2,4ab		0,0167a		0,0191a	
113T	16,9b	25,5b	2,0bc		0,0032b		0,003b	
67	16,0b	29,3b	2,8a		0,0195a		0,0156a	
45	23,2a	42,5a	1,6c		0,0166a		0,0212a	
I.C. 95%	9,1		0,2		0,0042		0,0066	

Tableau 8. Sommaire de l'ANOVA du potentiel hydrique préaube ( $\psi_{\text{préaube}}$ ) et du potentiel hydrique à mijour ( $\psi_{\text{mijour}}$ ) de l'expérience août (A). Valeurs de  $P$  des contrastes entre les types de plant de l'interaction R x J (B).

A-)

Source	d.l. num.	d.l. dén.	$\psi_{\text{préaube}}$		d.l. dén.	$\psi_{\text{mi-jour}}$	
			F	P		F	P
Bloc (B)	4	4	8,97	-	4	1,68	-
Traitement (T)	1	4	51,28	<b>0,002</b>	4	38,48	<b>0,0034</b>
Jour (J)	7	56	8,33	<b>&lt;0,0001</b>	55	17,49	<b>&lt;0,0001</b>
T x J	7	56	7,29	<b>&lt;0,0001</b>	55	21,36	<b>&lt;0,0001</b>
Réc. (R)	3	192	6,53	<b>0,0003</b>	190	15,80	<b>&lt;0,0001</b>
T x R	3	192	0,67	0,5694	190	0,81	0,4912
R x J	21	192	1,38	0,1316	190	3,04	<b>&lt;0,0001</b>
T x R x J	21	192	0,91	0,5813	190	1,05	0,4013

B-)

	$\psi_{\text{mi-jour}}$							
	Jour							
	Jour 1	Jour 3	Jour 8	Jour 11	Jour 15	Jour 18	Jour 23	Jour 26
R x J								
113 vs 67-45	0,9898	<b>0,0103</b>	<b>&lt;0,0001</b>	0,0945	<b>0,0117</b>	<b>0,0153</b>	<b>0,0134</b>	0,0697
113JC vs 113T	<b>0,0185</b>	0,0683	0,2232	<b>0,0003</b>	<b>&lt;0,0001</b>	0,6351	<b>0,0430</b>	<b>0,0088</b>
67 vs 45	0,6593	0,0504	0,0504	0,3785	0,2232	0,4162	0,5876	0,7346

(Tableau 9). En fait, EUE a augmenté simultanément pour les traitements stress et témoin jusqu'à un sommet aux jours 8-11 du traitement pour diminuer par la suite et se stabiliser au niveau qu'il était au début du traitement. Si, règle générale, EUE était systématiquement plus

élevée chez les plants stressés comparativement aux plants témoins, ces écarts étaient significatifs seulement aux jours 15 et 18 du traitement (Figure 8E). En moyenne, EUE des plants 113JC était significativement plus basse que celle des autres types de plants (Figure 8F).



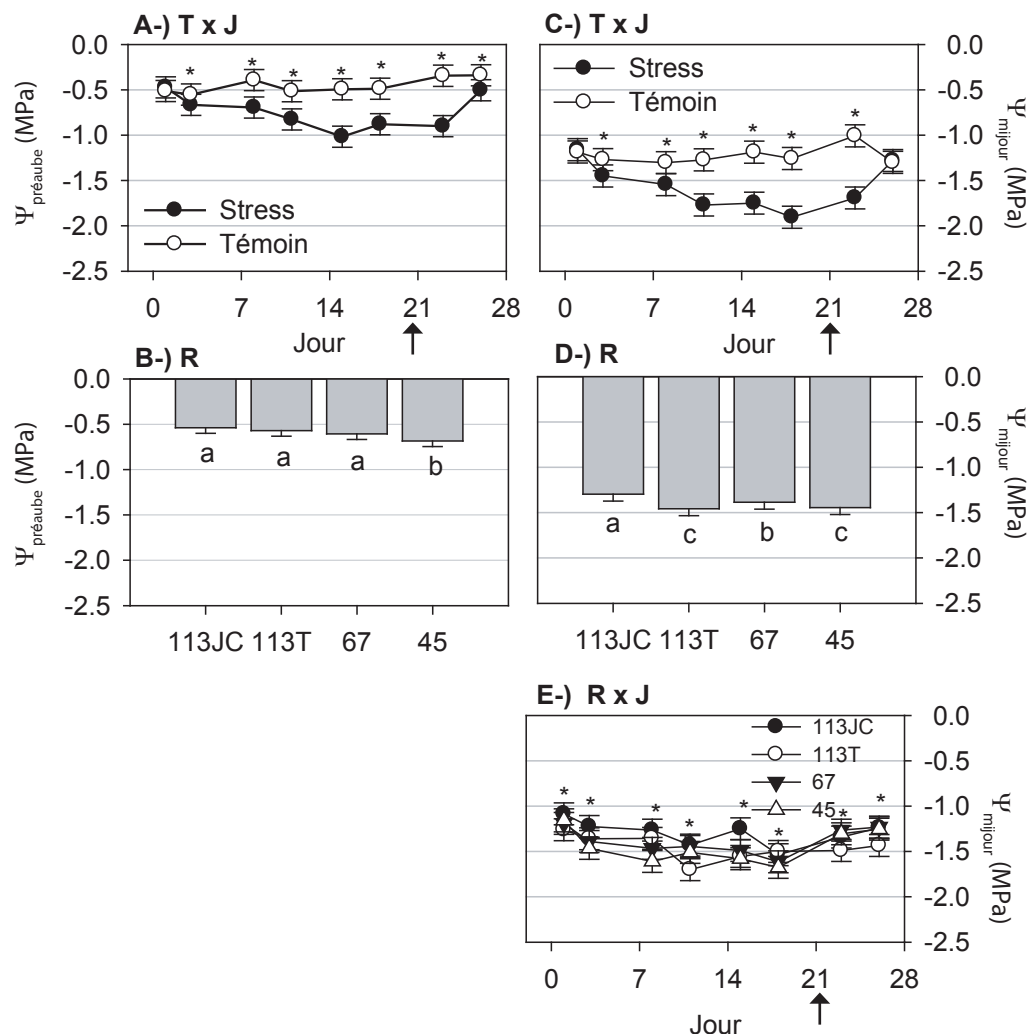


Figure 7. Potentiel hydrique préaube ( $\Psi_{\text{préaube}}$ ) de l'expérience août en fonction de l'interaction T x J (A) et des types de plant R (B). Potentiel hydrique à mijour ( $\Psi_{\text{mijour}}$ ) de l'expérience août en fonction de l'interaction T x J (C), des types de plant R (D) et de l'interaction R x J (E). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes ou de \* sont significativement différentes à  $P < 0,05$ . La flèche indique la fin du traitement de stress hydrique.

### Croissance

Le tableau 10A présente les sommaires de l'ANOVA pour les paramètres de croissance des plants de l'expérience août. Le traitement de stress hydrique a eu un effet significatif sur l'allongement racinaire sans modifier toutefois la répartition de la biomasse entre les racines et la tige. En ce qui a trait à l'allongement racinaire, l'interaction T x R était significative; l'inhibition de l'allongement des racines était plus marquée chez les plants 113T stressés (Tableau 10B). Le rapport biomasse tige/racine était plus bas chez les plants 45 suivi des 113JC, 67 et 113T. Le traitement de stress hydrique n'a pas influencé significativement le taux relatif de croissance de la biomasse totale ( $\text{TRC}_{\text{Total}}$ ) (Tableau 10A). Le  $\text{TRC}_{\text{Total}}$  des plants 113T était significativement plus grand que celui des trois autres types de plants (Tableaux 10B). Le

$\text{TRC}_{\text{Racines}}$  était significativement plus élevé chez les plants 113 comparativement aux 67 et 45. Aucune mortalité ou dommage foliaire n'a été observé.

### DISCUSSION

Notre hypothèse de départ était que les plants d'épinette noire de très petites dimensions cultivés dans les récipients 113-25 étaient moins résistants aux stress hydriques que des plants de plus gros gabarits. Cette hypothèse a été en partie réfutée. Règle générale, les plants 113 ont bien résisté à la sécheresse prolongée dans le cas des lots livrables en juillet et août lorsqu'ils avaient préalablement reçu un traitement photopériodique de jours-courts. La seule mortalité observée concernait les deux lots 113JC et 113T livrables en juin. Même si elle est faible, cette mortalité démontre une certaine fragilité des mini-plants

Tableau 9. Sommaire de l'ANOVA de la photosynthèse nette ( $P_n$ ), de la conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{ve}$ ) et de l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) de l'expérience août.

Source	Photosynthèse ( $P_n$ )								Efficacité d'utilisation de l'eau (EUE)		
	d.l. num.	d.l. dén.	$F$	$P$	Conductance ( $g_{ve}$ )			d.l. dén.	$F$	$P$	
					d.l. dén.	$F$	$P$				
Bloc (B)	4	4	1,59	-	4	2,34	-	4	0,35	-	
Traitement (T)	1	4	15,23	<b>0,0175</b>	4	40,08	<b>0,0032</b>	4	11,13	<b>0,0289</b>	
Jour (J)	7	56	9,55	<b>&lt;0,0001</b>	55	30,06	<b>&lt;0,0001</b>	56	63,76	<b>&lt;0,0001</b>	
T x J	7	56	3,13	<b>0,0074</b>	55	5,07	<b>0,0002</b>	56	3,31	<b>0,0051</b>	
Réc. (R)	3	191	6,12	<b>0,0005</b>	191	8,03	<b>&lt;0,0001</b>	191	4,67	<b>0,0036</b>	
T x R	3	191	1,86	0,1385	191	2,47	0,0630	191	0,63	0,5989	
J x R	21	191	0,90	0,5912	191	1,05	0,4071	191	1,01	0,4564	
T x J x R	21	191	0,99	0,4793	191	1,42	0,1141	191	0,91	0,5831	

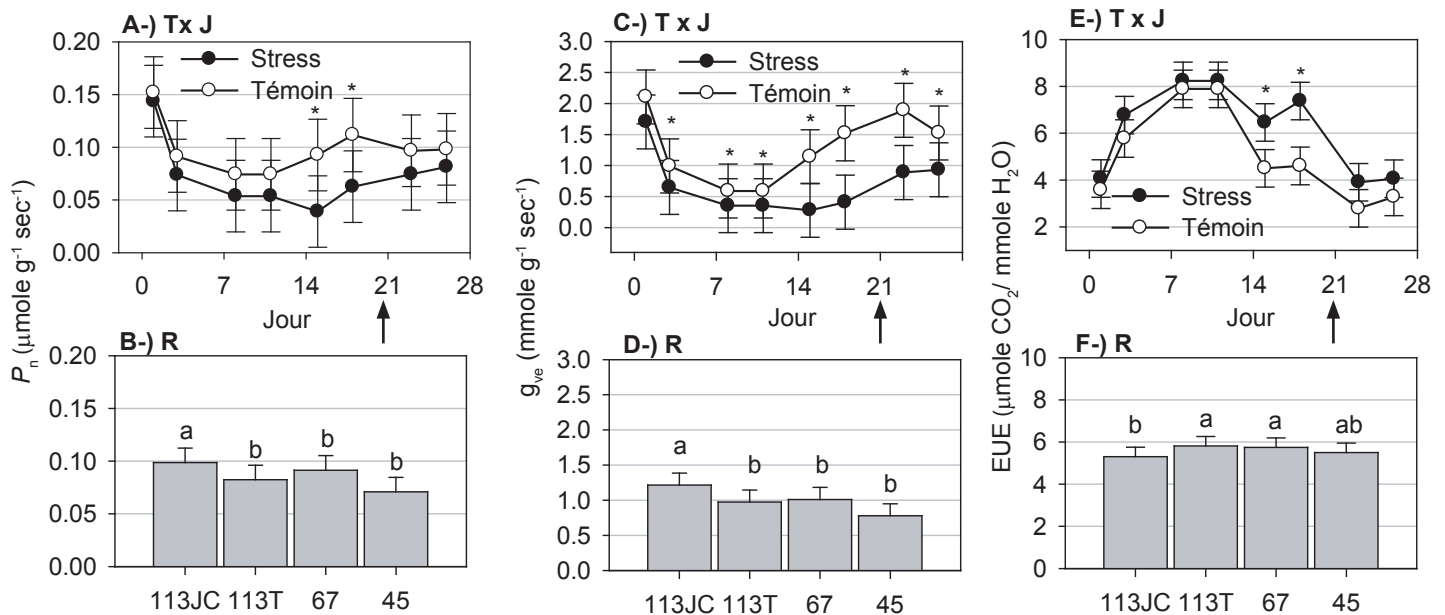


Figure 8. Photosynthèse nette ( $P_n$ ) de l'expérience août en fonction de l'interaction T x J (A) et des types de plant R (B). Conductance stomatique à la vapeur d'eau ( $g_{ve}$ ) de l'expérience août en fonction de l'interaction T x J (C) et des types de plant R (D). Efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE) de l'expérience août en fonction de l'interaction T x J (E) et des types de plant R (H). Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95%. Les moyennes surmontées de lettres différentes ou de \* sont significativement différentes à  $P < 0,05$ .

comparativement à des plants de plus gros gabarit.

En juin, le traitement de jour-court a eu lieu immédiatement avant l'expérience ce qui ne laisse pas suffisamment de temps aux plants pour s'endurcir; l'enracinement n'était pas non plus optimal si on compare ce lot avec ceux livrables en juillet et août. Il est reconnu que l'endurcissement au stress hydrique augmente progressivement durant la période de deux mois qui suit le traitement photopériodique et les plants traités en jours-courts ont encore un faible niveau de résistance au stress juste après la plantation (Grossnickle 2000). Notre protocole était conforme à la réalité terrain puisque les plants livrables en juin ne bénéficient pas d'une période d'endurcissement après le traitement de jours-courts avant d'être expédiés en forêt.

Le traitement photopériodique de jours-courts est utilisé principalement pour contrôler la hauteur des plants et stimuler l'enracinement tout en favorisant la tolérance au froid et à la sécheresse (Heide 1974; Grossnickle et al. 1991a; Calmé et al. 1993; Grossnickle 2000). Nos résultats montrent que ce traitement a été efficace pour contrôler la hauteur et favoriser l'enracinement car en juillet et août, les lots 113T avaient une hauteur semblable aux plants 67 et une densité racinaire plus faible que les lots 113JC. Les deux lots de 113 livrables en juin avaient la même taille au début de l'expérience soit 12-13 cm mais le lot témoin a cru en hauteur durant l'expérience pour atteindre 18-19 cm à la fin de celle-ci tandis que la croissance en hauteur a été parfaitement contrôlée pour le lot traité (données non-présentées).

Tableau 10. Sommaire de l'ANOVA de la longueur des deux plus longues racines, du rapport biomasse tige/racines, du taux relatif de croissance total ( $TRC_{Total}$ ) ainsi que du taux relatif de croissance de la biomasse racinaire ( $TRC_{Racines}$ ) à la fin de l'expérience août (A). Moyennes et intervalles de confiance à 95% (I.C. 95%) des paramètres de croissance mesurés à la fin de l'expérience août. Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes à  $P \leq 0,05$  (B).

A-)

Source	d.l. num.	d.l. dén.	Longueur des racines		Biomasse tige/racines		$TRC_{Total}$ (mg/mg jour)		$TRC_{Racines}$ (mg/mg jour)	
			F	P	F	P	F	P	F	P
Bloc (B)	4	4	0,49	-	0,99	-	8,70	-	3,64	-
Traitement (T)	1	4	13,09	<b>0,0224</b>	1,01	0,3724	0,61	0,4784	2,41	0,1958
Réc. (R)	3	24	5,98	<b>0,0034</b>	5,85	<b>0,0038</b>	12,04	<b>&lt;0,0001</b>	4,83	<b>0,0091</b>
T x R	3	24	4,10	<b>0,0175</b>	0,87	0,4721	0,25	0,8606	1,07	0,3805

B-)

Plants	Longueur des racines (mm)		Biomasse tige/rac. (mg/mg)	$TRC_{Total}$ (mg/mg jour)	$TRC_{Racines}$ (mg/mg jour)
	Stress	Témoin			
113JC	17cd	16d	1,6a	0,0062b	0,0212a
113T	7d	30bc	1,9a	0,0328a	0,0246a
67	21cd	42ab	1,6a	0,0057b	0,0045b
45	17cd	46a	1,1b	0,0097b	0,0131b
I.C. 95%	11		0,30	0,0068	0,0078

Dans notre expérience, le niveau de stress hydrique a été évalué à l'aide du potentiel hydrique préaube et mijour. On pourrait qualifier le niveau de stress hydrique de modéré à sévère puisque  $\Psi_{mijour}$  a atteint -2 MPa vers la fin du traitement dans les trois volets de l'expérience. D'après Colombo et al. (2001), un potentiel hydrique de -1 MPa est considéré comme léger, des valeurs entre -1 et -2 MPa de modérées, les semis pouvant généralement se rétablir; un potentiel hydrique autour de -2MPa peut causer la mort des plants. Landis (1989) qualifient un  $\Psi_{mijour} < -1,5$  MPa de sévère, pouvant causer des dommages aux plants. Coutts (1981) a observé que la mortalité des semis d'épinette Sitka survient à partir d'un potentiel hydrique mijour des aiguilles de -1,6 MPa. Dans le traitement de sécheresse qualifié de sévère par Lamhamedi et al. (1996), les plants d'épinette noire avaient un  $\Psi_{mijour}$  entre -1,5 et 2 MPa ce qui est similaire aux résultats de notre expérience. Le traitement de stress hydrique était assez sévère pour provoquer des dommages aux aiguilles dans les lots livrables en juin et causer une certaine mortalité chez les semis 113JC et 113T. Cette mortalité était marginale si on la compare au taux de survie de seulement 6% chez des semis d'épinette noire exposés à 12 jours de sécheresse où le substrat avait atteint moins de 10% de sa capacité au champ dans l'expérience de Buxton et al. (1985).

Le traitement de sécheresse était accompagné de

températures de l'air très élevées dans le tunnel où se déroulait l'expérience, ce qui a renforcé l'ampleur du stress hydrique. Les températures au sol étaient très élevées le jour mais en deçà des températures qui peuvent causer des lésions, soit 44-50°C selon Larcher (2003). Les dommages apparaissent chez l'épinette noire à partir de 40°C (Colombo et Timmer 1992). Cependant, les températures élevées durant les expériences de juin et juillet et à un moindre niveau d'août ont provoqué la fermeture partielle des stomates comme le montre la diminution de  $g_{ve}$  en fonction de DPV des plants témoins de l'expérience juin. La photosynthèse chez l'épinette noire atteint son maximum autour de 20°C et diminue par la suite tandis que la respiration augmente exponentiellement (Lamhamedi et Bernier 1994). Le déficit de pression de vapeur était en moyenne de 1,5 KPa avec des pics à 3,0 KPa. Des valeurs élevées du DPV causent la fermeture partielle des stomates, prévenant ainsi les pertes excessives en eau, ce qui en retour diminue l'assimilation du  $CO_2$  lors de la photosynthèse (Ashimoto et al. 2008). Les stomates se ferment généralement lorsque la DPV augmente et la réponse est généralement une décroissance non-linéaire de  $g_{ve}$  avec une augmentation de DPV (Addington et al. 2004). Hinesley et Snelling (1991) ont montré que la dessiccation chez le pin blanc et le sapin Fraser était accélérée par l'augmentation du DPV. Les valeurs idéales pour une croissance en serre des plants forestiers se situent entre 0,6 et 1,6 KPa (Landis et al. 1992).

Si on regarde les normales climatiques des 30 dernières années, les valeurs de DPV à la station météo de Val D'Or dans la limite de la forêt boréale commerciale (45°03 N, 74°47) sont de 1,4 kPa en moyenne pour les mois de juillet et août (Environnement Canada 2012). Day (2000) cite le cas de la station forestière de Penobscot (U. du Maine) où le DPV est supérieur à 2kPa dans 91% des jours de juillet et août. La croissance racinaire l'épinette noire décline à un déficit de la pression de vapeur à saturation (DPVS autour de 2.0–2.5 kPa) (Darlington et al. 1997). Groot et al. (1997) ont montré que sur les aires de coupes à blanc, les valeurs du DPV étaient modérées (2-3 KPa) durant 22% de la journée et élevées (> 3 KPa) 16% du temps. Le DPV est le paramètre environnemental qui influence le plus les échanges gazeux des conifères lorsque la température du sol et l'eau ne sont pas limitants (Grossnickle 2000).

L'épinette noire et l'épinette blanche sont très sensibles à la demande d'évaporation atmosphérique et au stress hydrique; le stress hydrique couplé à un Déficit Hydrique Absolu (DHA) et un faible développement de nouvelles racines résultent en la stagnation de la plantation «growth check» parce que les plants ne peuvent maintenir un bilan hydrique favorable (Grossnickle et Blake 1986). Chez l'épinette de l'Intérieur, la conductance des aiguilles est inversement reliée au déficit de pression de vapeur (DPV) et la magnitude de cette réponse varie fortement en fonction des clones (Grossnickle et Fan 1998). Dans notre expérience, nous n'avons pas vu de corrélations entre  $g_{ve}$  et  $P_n$  et DPV pour les plants du traitement de stress hydrique, tandis que les corrélations étaient modérées pour le traitement témoin. Les valeurs élevées de DPV ont donc causé la fermeture partielle des stomates mais ce fait était masqué dans le traitement de stress hydrique où le potentiel hydrique très bas a induit la fermeture des stomates. D'après Grossnickle et Blake (1986), un déficit hydrique de l'air peut engendrer une diminution significative du potentiel hydrique même lorsque les conditions d'humidité du sol sont optimales.

La sécheresse a provoqué une diminution significative de  $\Psi_{préaube}$  après seulement une semaine de sécheresse dans les trois expériences. Les valeurs plus élevées du  $\Psi_{préaube}$  comparativement au  $\Psi_{mijour}$  nous indiquaient que le  $\Psi$  des plants se rééquilibrait durant la nuit. Nous avons observés que la nuit (durant les mesures de  $\Psi_{préaube}$ ) le feuillage des plants était couvert de rosée ce qui a sans doute contribuer à la reprise de la turgescence des plants. Boucher et al. (1995) ont démontré que la rosée augmente le  $\Psi$  (moins

négatif) et la  $g_{ve}$  de même que la croissance racinaire chez les semis de pin blanc soumis à un stress hydrique.

On note cependant une mortalité chez les deux lots 113 livrables en juin après 21 jours de traitement de stress hydrique. De plus, on remarque une mauvaise récupération après le traitement de stress hydrique chez ceux-ci une semaine après la fin du traitement de stress hydrique puisque  $\Psi_{mijour}$  était significativement plus bas que celui des plants 67 et 45. Les plants tels l'épinette noire qui a une faible résistance au stress hydrique sont plus susceptibles à la cavitation qui limite le transport de l'eau dans les vaisseaux et la survie des plants (Blake et Li 2003). Tear et al. (1982) ont remarqué que les plants d'épinette blanche plus jeunes (1 mois) étaient plus sensibles aux stress hydriques que les plants plus âgés (3 mois) ce qui indique que le développement de la capacité de contrôler les pertes en eau augmente avec l'âge du semis.

Simultanément, on a pu observer une perte de turgescence durant la journée chez la plupart des plants. Colombo (1987) considère que la pression totale de turgescence est un bon indicateur de la survie et du potentiel de croissance des semis plantés en forêt. Le point de perte de turgescence est normalement de -1,5 MPa (Tear et al. 1982). Fan et al. (1994) ont déterminé que le potentiel osmotique à zéro de turgescence ( $\Psi_{ppt}$ ) est de -1,5 MPa pour l'épinette noire et que le conditionnement au stress hydrique ne change pas cette valeur; le maintien de la turgescence chez cette espèce est le fait de l'ajustement élastique sans ajustement simultanée du potentiel osmotique. Zine El Abidine et al. (1995) ont montré qu'il existe un patron saisonnier du  $\Psi_{ppt}$  chez l'épinette noire qui se situe autour de -1,4 MPa en juillet et diminue graduellement jusqu'à - 2,4 MPa en octobre. D'après Landis (1989), la croissance est inhibée à partir de -1,0 MPa. L'interprétation des mesures de  $\Psi$  en fonction de la qualité d'un lot de plants n'est pas toujours évidente (Colombo et al. 2001); ces auteurs considèrent qu'il serait justifié d'évaluer plus à fond la condition d'un lot de plants dont  $\Psi$  chute plus bas que -2,0 MPa. D'ailleurs, Paquin et al. (2000) et Hébert et al. (2010) ont enregistré des valeurs de  $\Psi_{mijour}$  de près de -2,0 MPa chez des plants d'épinette noire reboisés sur des sites récoltés. Lamhamedi et al. (1998) ont enregistré des valeurs de  $\Psi_{mijour}$  de -3,0 MPa en août sur des sites de plantation. Le  $\Psi$  qui entraîne la mort du semis varie d'une espèce à l'autre comme l'a démontré Brix (1979) qui a observé une mortalité chez la pruche de l'Ouest à partir d'un  $\Psi$  de -0,5 MPa, tandis que la mortalité ne survient chez le

Douglas latifolié, le pin lodgepole ou l'épinette blanche qu'à partir de  $\Psi \leq 1$  MPa.

Ces résultats suggèrent que dans le cas des 113 livrables en juin, la valeur limite de stress hydrique induisant la cavitation est plus basse et est atteinte chez une partie des plants après 3 semaines de sécheresse. Dans le cas des plants livrables en juillet et août, tous les lots de plants ont bien récupéré si on se fie aux valeurs de  $\Psi$  puisque nous n'avons pas noté de différences significatives de ceux-ci entre les plants témoins et stressés après la période de récupération qui suivait le stress hydrique. Il est reconnu que les semis sont plus tolérants au stress hydrique durant l'été et l'automne comparativement au printemps (Ritchie 1984). D'ailleurs,  $\Psi_{\text{préaube}}$  est descendu à un niveau moins bas durant l'expérience août.

Généralement, les plants 67 et 45 avaient un  $\Psi$  plus bas que celui des plants 113 durant la période de stress hydrique même s'ils récupèrent mieux après celui-ci. Ces résultats concordent avec ceux de Lamhamedi et al. (1997) qui ont montré que le  $\Psi$  était plus bas chez les plants d'épinette de plus grande taille en situation de stress hydrique, ce qui s'expliquerait par une masse foliaire plus imposante et donc d'une surface d'évaporation plus importante. La masse aérienne des plants 45 était en moyenne six fois plus importante que celle des plants 113. Le contenu en eau de la carotte de plants d'épinette noire de plus grand volume décroît généralement plus rapidement; par contre, ces différences s'estompent lorsque le stress hydrique et le DPV sont plus sévères (Stewart et Bernier 1995). Dans une expérience sur la résistance au stress hydrique de l'épinette de Norvège, Helenius (2005) a mesuré la teneur en eau de la carotte de plants en récipient planté sur un site forestier; le contenu en eau de la carotte passait de 70% à 15% en une semaine en absence de pluie et à 6% après quatre semaines. La mortalité était négligeable pour une période de sécheresse ne dépassant pas trois semaines si la carotte était bien humectée avant la plantation.

Des échanges gazeux réduits est une autre indication du stress hydrique (Lamhamedi et al. 1997). La largeur des stomates est contrôlée par la turgescence des cellules de garde. Dans les expériences de juillet et août, les plants 113JC avait des valeurs de  $P_n$  et  $g_{ve}$  significativement plus élevées que les autres plants, sans que cela entraîne une déshydratation excessive et une baisse plus marquée du  $\Psi$  comparativement aux autres plants. En fait, le traitement

de jours-courts stimule la photosynthèse en réduisant la respiration (Hawkins et al. 1994). Par contre en juin, les plants 113JC se comportent comme les 113T : l'ouverture plus grande des stomates a entraîné une déshydratation marquée par un  $\Psi_{\text{mijour}}$  plus bas à la fin de l'expérience. Le traitement de jours-courts était trop rapproché de la période de sécheresse pour que l'endurcissement des plants soit efficace. D'ailleurs la sécheresse a entraîné la mort de quelques plants uniquement dans les lots 113T et 113JC.

Blake et Li (2003) ont observé que les dommages aux membranes cellulaires empêchent la réouverture des stomates chez l'épinette noire lorsqu'ils sont réhydratés après une déshydratation modérée à sévère. Ce phénomène n'a été constaté dans notre expérience de juillet que pour le lot de 113T. Ces plants avaient un niveau de  $P_n$  systématiquement plus bas que les autres au cours de l'application du stress hydrique et durant la période de récupération qui suivait tandis que les plants 113JC affichaient au contraire des valeurs de  $P_n$  systématiquement plus élevées que les autres types de plant. Les valeurs de  $g_{ve}$  montrent que les stomates étaient partiellement ouverts durant le traitement de stress hydrique, sauf à la toute fin du traitement. Chez l'épinette de l'Intérieur, la  $g_{ve}$  décroît exponentiellement en fonction de la diminution du  $\Psi_{\text{préaube}}$  (Fan et Grossnickle 1998); les clones les plus tolérants avaient un taux d'échange gazeux durant le stress hydrique plus élevé et récupérait plus rapidement que ceux moins bien adaptés. Les niveaux d'ABA dans les aiguilles de plants d'épinette noire soumis à des stress hydriques répétés étaient plus élevés une semaine après le ré-arrosage comparativement au niveau pré-stress ce qui expliquerait les valeurs de  $g_{ve}$  et  $P_n$  plus basses à la fin de la période de récupération (Fan 1994; dans Fan et Grossnickle 1998). Les familles d'épinette noire les plus vigoureuses en conditions de sécheresse ont un meilleur ajustement osmotique et maintiennent des valeurs de  $P_n$  supérieures durant la sécheresse et recouvrent leurs valeurs de  $P_n$  plus rapidement suite à l'élimination du stress (Tan et Blake 1997).

L'EUE est un bon indice de tolérance au stress hydrique. Quand les stomates sont complètement ouverts, la fixation du  $\text{CO}_2$  est limitée plus sévèrement que le passage de  $\text{H}_2\text{O}$ ; un compromis favorable se produit entre la consommation de l'eau et la fixation du  $\text{CO}_2$  lorsque les stomates sont entrouverts au début d'un déficit hydrique; l'EUE est alors le plus élevée (Larcher 2003). C'est ce qui explique les valeurs plus élevées après deux semaines de stress hydrique dans



les expériences de juillet et août. Les écarts entre les types de plants étaient faibles même s'ils étaient significatifs. Ces écarts n'étaient significatifs que durant une courte période durant l'expérience juillet et d'août. Les 113JC étaient défavorisés à ce chapitre. L'interprétation de EUE dans un contexte de stress hydrique ne fait pas consensus. Chez le pin ponderosa, la tolérance à la sécheresse n'est pas reliée à un EUE élevé (Zhang et al. 1997). Lorsque  $\Psi$  augmente,  $P_n$  décroît linéairement tandis que  $g_{ve}$  décroît exponentiellement ce qui fait que l'EUE est plus élevée chez les plants stressés (Smit et Van Den Driessche 1992; Zhang et Marshall 1994; Zhang et al. 1997; Olivas-garcia et al. 2000). Les valeurs de  $g_{ve}$  sont très affectées par le stress hydrique et  $g_{ve}$  est le paramètre qui influence le plus l'EUE (de Miguel et al. 2011). Chez l'épinette noire, l'EUE augmente si le stress hydrique est modéré ( $\Psi \cong -1,5$  MPA) mais diminue si le stress est plus élevé (Zwiazek et Blake 1989).

Les valeurs de  $P_n$  des plants 113JC étaient plus élevées que les autres types de plant, ce qui s'est reflété dans le TRC total ainsi que racinaire qui étaient eux aussi significativement plus élevés ou du moins comparables à ceux des trois autres types de plants. Ces résultats confirment ceux de Walsh et al. (2011) qui ont montré que le TRC en plantations des mini-plants d'épinette noire cultivés en récipients 126-15 ou 126-25 était supérieurs à ceux des plants conventionnels. Ces résultats montrent donc un potentiel de croissance évident des mini-plants même dans des conditions très sévères.

Il s'est produit une réallocation du C vers le développement de la tige au détriment des racines puisque que le rapport biomasse épigée/racinaire avait augmenté comparativement à ce qu'il était au début de l'expérience. Ceci indique que l'épinette noire est mal adaptée au stress hydrique puisque le changement du rapport tige/racines en faveur des racines est un mécanisme permettant l'évitement de la dessiccation, les plantes les mieux adaptées à la sécheresse allouant une plus grande partie de leurs ressources aux racines (Larcher 2003). Quand la quantité d'eau est limitée, les ressources carbonées sont dirigées plus directement vers les racines, ce qui est prédit par le modèle de Thorneý basé sur l'assimilation et le transport du C et de N (Wilson 1988). Le stress hydrique a inhibé l'allongement des nouvelles racines hors de la motte de tourbe de près de 50%. Dans le cas des plants produits en récipients, les racines sont confinées à la carotte de tourbe et lorsque la portion supérieure du sol s'assèche, les PFD ayant une carotte de tourbe plus longue devraient avoir accès à une source d'eau plus longtemps

(Burdett 1990). La faible densité racinaire des 113-25 relativement aux autres types de plants signifie aussi que la carotte de tourbe peut contenir une plus grande réserve d'eau relativement à la taille du plant. South et Mitchell (2005) ont montré chez *Pinus palustris* qu'à un certain niveau, une trop forte densité racinaire réduisait la survie des semis en plantation. La densité racinaire était nettement plus faible chez les 113 comparativement aux 67 et 45 en juin. Dans l'expérience juin, les plants 45 avaient une densité racinaire double de celles des deux lots 113 et leur  $TRC_{\text{Racines}}$  était le plus faible au cours de l'expérience juin. Lamhamedi et al. (1997) explique la piètre performance en situation de stress hydrique des PFD d'épinette noire à leur système racinaire trop dense et compact, ce qui aurait réduit l'absorption de l'eau. South et Mitchell (2006) ont montré qu'un système racinaire trop dense diminue la survie des plants de *Pinus palustris* et *Pinus elliotii* x *carabaea* en plantation. Un rapport tige : racines élevé signifie que les racines sont peu abondantes p/r au feuillage et que les plants sont alors plus susceptibles de souffrir de la sécheresse. Pour les plants en récipient un rapport tige/racines 2 et moins correspond à une bonne répartition de la biomasse (Haase 2001). D'après Bernier et al. (1995a), cette affirmation s'applique aux plants à racines nues mais pas aux plants cultivés en récipient. Dans ce dernier type de culture, les conditions de croissance ne sont pas limitées, ce qui favorise la prolifération racinaire au-delà des stricts besoins physiologiques des plants; en plantation, l'interface entre la carotte et le sol impose une limite plus importante au passage de l'eau que les racines elles-mêmes. Dans ce sens, le rapport tige/racines plus élevé et une densité racinaire plus faible aurait été un désavantage vis-à-vis la sécheresse des deux lots 113 de juin. Cependant des dommages foliaires ont un impact relativement plus fort sur des plants plus petits. Les plants 113 de juin, même s'ils ont subi des dommages foliaires plus faibles, ont eu une mortalité tandis que des plants 45 ayant subi des dommages foliaires de l'ordre de 20-30% ont survécu. Grossnickle (2012) cite de nombreuses études de plants cultivés en récipients où le taux de survie était meilleur lorsque le rapport tige/racine était bas; selon lui cependant, le rapport de la masse des racines se développant hors de la carotte sur la biomasse sèche totale serait un meilleur indicateur du potentiel d'évitement du stress hydrique.

En juillet, la situation était différente puisque les plants 113 avaient une densité racinaire plus forte que les autres plants et les 45 une densité plus faible qu'en juin. Les 45 ont eu une meilleure croissance, comme le montre l'allongement

racinaire et le  $TRC_{Total}$  et  $TRC_{Racines}$ . La forte densité racinaire des 113JC ne les a pas empêché de bien performé puisqu'ils ont un  $TRC_{Total}$  et un  $TRC_{Racines}$  similaires à ceux des plants de juin. Seuls les plants 113T ont eu une croissance anémique. Les bonnes performances des plants 113JC s'explique par des valeurs de  $g_{ve}$  et  $P_n$  significativement plus élevées que les autres plants.

En août, le traitement de stress hydrique n'a pas eu d'effet sur le TRC même si l'allongement racinaire était moindre sauf dans le cas des 113JC. Là encore, les valeurs de  $P_n$  des plants 113JC étaient significativement plus élevées par rapport aux autres types de plant. Luoranen et al. (2007) ont observé une réduction moins importante de la croissance des nouvelles racines de l'épinette de Norvège en situation de stress hydrique lorsque les plants étaient traités en jours-courts. Pour tous les plants, la diminution de  $P_n$  était moins radicale que lors des expériences de juin ou de juillet. À ce moment-là, l'aoûtement des plants était déjà passablement avancé chez les 67 et 45, 65% des plants ayant un bourgeon apical formé. Des plants de *Tsuga heterophylla* traité en jours-courts ont le même niveau de photosynthèse que ceux qui n'ont pas été traités lorsqu'il n'y a pas de déficit hydrique mais conserve un niveau plus élevé sous un stress hydrique modéré (Grossnickle et al 1991a; Folk et Grossnickle 1996). Zine El Abidine et al. (1995) ont observé pour leur part un patron saisonnier, soit une diminution constante du taux de photosynthèse durant la saison des semis d'épinette noire croissant sous des conditions atmosphériques naturelle. On n'a pas observé de variation saisonnière des valeurs de  $P_n$  des plants témoins comme c'est normalement le cas. Cette valeur se maintenait autour de 0,08-0,10  $\mu\text{mole g}^{-1}.\text{sec}^{-1}$  de juin à septembre pour les plants témoins. De plus, les plants avaient complètement récupéré une semaine après la fin de la sécheresse.

Plusieurs avenues s'offrent aux pépiniéristes et aux reboiseurs pour minimiser l'impact d'un stress hydrique sur la survie et la croissance des semis en plantation. La première est de bien humecter la carotte avant la plantation. Cette action est simple à réaliser et peu dispendieuse. L'humidité de la carotte avant la plantation est un facteur clé de la survie et la croissance des plants reboisés sur des sols secs (Helenius 2005; Helenius et al. 2005; Heiskanen et Rikala 2000). Helenius (2005) a d'ailleurs montré que la mortalité des semis d'épinette de Norvège dont les carottes ont été mouillées à saturation était négligeable, même après une période de sécheresse de quatre semaines. La performance

des plants est fortement affectée lorsque le contenu en eau de la carotte descend en bas de 20% (Helenius et al. 2005). Une autre mesure qui peut facilement être appliquée est la plantation plus profonde des plants. La carotte serait alors en contact plus avec les couches plus profondes du sol qui restent plus longtemps humides. Un autre bénéfice serait la formation de racines adventives. Il n'a cependant pas d'avantages physiologiques démontrés au plan du statut hydrique (Yaakoubd 1997). La plantation profonde de semis d'épinette noire n'affecte en rien leur survie et leur croissance ultérieure de l'épinette noire, de l'épinette blanche et du pin gris (Paquette et al. 2011) ou entraîne une augmentation minime de la croissance et de la survie des plants d'épinette blanche (Macadam et Bedford 1998). En Scandinavie, la plantation profonde est recommandée pour éviter la sécheresse pour la plantation sur monticule après une préparation de terrain au Bracke (Adekskol et Orlander 1990; Luoranen et al. 2011). Johansson (2004) a montré que les mini-plants d'épinette de Norvège sont plus sensibles à l'intensité de la préparation de terrain. Sur un site sans préparation de terrain, la mortalité pouvait atteindre 50% chez des mini-plants en croissance produits en 10 semaines (Johansson et al. 2007).

Les propriétés physiques du substrat de culture qui sont désirables en pépinière ne coïncident pas nécessairement avec les propriétés désirées pour optimiser la plantation. Un drainage rapide en pépinière signifie aussi que la carotte peut s'assécher très rapidement en plantation (Nilsson et al. 2010). En pépinière, le substrat doit de drainer rapidement pour permettre l'aération du système racinaire ce qui peut diminuer la disponibilité en eau sous les conditions qui prévalent en plantation (Bernier et al. 1995b). À des  $\Psi$  que l'on retrouve en condition naturelle, la disponibilité de l'eau dans la carotte devient très faible après quelques jours (Bernier et al. 1995b). Il est donc important d'arroser abondamment les plants avant la plantation. La mortalité lors d'une sécheresse de 4 semaines peut être fortement limitée lorsque la carotte est humectée à saturation (Helenius 2005). Des études seraient aussi nécessaires pour déterminer si l'ajout de vermiculite à la tourbe prolongerait le temps de survie face à la sécheresse.

Dans cette expérience, le traitement de jours-courts a augmenté la résistance à la sécheresse des plants 113-25 durant les expériences de juillet et août. En plus, les valeurs de  $P_n$  étaient supérieures aux autres types de plants. On pourrait sans doute augmenter la résistance au stress

hydrique notamment pour les plants livrables en juin par le pré-conditionnement au stress hydrique. Ce traitement consiste à soumettre les plants cultivés en pépinière à des stress hydriques modérés. Appliquée en pépinières, des stress modérés répétées (-1,5 MPa) peuvent induire une tolérance à la sécheresse en plantation (Hodgson 2011; Grossnickle 2012). Les plants d'épinette noire pré-conditionnés par des stress hydriques sont capables de maintenir leur turgescence au moment où les plants non-conditionnés se flétrissent (Zwiazek et Blake 1989). Les semis de pin ponderosa pré-conditionnés survivent plus longtemps à la sécheresse (+14 jours) que ceux qui n'ont pas été traités (Cregg 1994). Ce traitement est souvent appliqué simultanément avec le traitement de jours-courts pour induire la dormance. Les stress hydriques seuls n'induisent pas la dormance chez l'épinette noire (Odlum et al. 2001). Cette pratique devrait être encouragée chez les producteurs de plants d'épinette noire en récipients 113-25 lors des traitements de jours-courts.

Les plants 113JC livrable en juin ont démontré une résistance moindre à la sécheresse comparativement aux autres lots. Le calendrier de production ne permet pas d'avoir une période d'endurcissement suffisante avant la livraison même si le traitement a été efficace pour contrôler la hauteur de la tige. Ces plants sont donc à risque immédiatement après la plantation. Pour l'épinette de Norvège le traitement de jours-courts ne peut débuter avant juillet sinon il y a un risque que les plants débourrent par la suite et le débourrement de l'année suivante est aussi devancé, ce qui expose les plants au gel tardif printanier (Nilsson et al 2010). Kohmann et Johnsen (2007) ont trouvé que c'est la longueur de la nuit qui détermine le débourrement chez l'épinette de Norvège. En juin, les nuits sont les plus courtes de l'année ce qui rend difficile l'application d'un traitement de jours-courts efficace. Pour Luoranen et al. (2009), les risques de débourrement de l'épinette de Norvège augmentent lorsque la somme de température est plus grande que 450 degré-jour entre la fin du traitement et la mi-août. Le débourrement est plus fréquent lorsque le traitement dure deux semaines au lieu de trois semaines (Luoranen et al. 2009). Le débourrement est lié au stade de développement du semis; quand la somme de température au début des traitements de jours-courts est plus élevé que 300 degrés-jours, c'est-à-dire lorsque la tige de l'année en cours est suffisamment allongée, les risques de débourrement sont faibles; malgré tout, les plants traités tôt en saison ont plus de risques de débourrer (Luoranen et al. 2009). C'est pour cette raison que le traitement de jours-

courts sera toujours problématique pour les lots livrables très tôt en saison. Des recherches seraient nécessaires pour optimiser le traitement de jours-courts chez l'épinette noire lorsqu'il est exécuté au printemps.

En Scandinavie, on contourne ce problème en utilisant pour les plantations printanières qui peuvent aller jusqu'à la mi-juin, des lots de plant qui ont été stockés en chambre réfrigérée (Nilsson et al. 2010). Le stockage au froid à des températures entre -2°C et -5°C durant l'hiver permet la plantation de lots de plants dormants et donc plus résistants aux stress (Odlum et al. 2001). La Colombie-Britannique utilise aussi ce procédé pour les plantations «printanières»; plus de 100 millions de plants sont reboisés de cette façon chaque année, soit de la mi- fin-avril jusqu'au 21 juin (Kiiskila 2005). Un essai opérationnel sur des plants de pin gris et d'épinette noire produits dans le récipient 67-50 a eu lieu au Québec en 1991 (Lambany 1994); les plants d'épinette entreposés en octobre et novembre et ceux de pin gris entreposés en novembre avaient un rendement semblable aux plants entreposés sous couvert de neige. Si techniquement l'entreposage au froid des plants forestiers utilisés pour les plantations printanières est maîtrisé, il n'est pas évident que les coûts supplémentaires soient justifiés en regard des avantages recherchés. Les coûts additionnels devraient être pondérés en fonction des avantages comme la suppression des pertes dues aux gels automnaux ou printaniers et le fait que ces plants sont plus résistants aux stress lors de la plantation (Colombo 1990; Odlum et al. 2001). D'ailleurs, les premiers essais de stockage au froid des plants forestiers en Ontario ont été réalisés après les pertes importantes causées par la dessiccation hivernale et le gel racinaire subis par les plants durant les hivers de 1985 et 1986 (Whaley et al. 1995). La technique d'entreposage au congélateur est aujourd'hui bien maîtrisée. Par exemple, 24 espèces différentes de résineux ou de feuillus sont entreposées au froid avec succès (Hee 1987).

Un autre moyen d'augmenter la tolérance à la sécheresse est l'emploi de médiateurs chimiques; le plus connu est le paclobutrazol. Les semis d'épinette blanche prétraités au paclobutrazol ont montré une résistance à la sécheresse marquée, résistance liée au maintien de la pression de turgescence (Marshall et Drumbroff 1999); les mêmes observations sont valides aussi pour le pin gris (Marshall et al. 1991). Dans une expérience réalisée par Marshall et al. (2000), la totalité des semis d'épinette noire témoins mourraient après 12 jours de sécheresse tandis que 50%



de ceux traités au paclobutrazol survivaient à 15 jours de stress. Cependant, le paclobutrazol a eu l'effet inverse sur l'épinette blanche lorsqu'appliqué juste avant la plantation (Van Den Driessche 1996). De plus, le paclobutrazol induirait la dormance chez les semis d'épinette noire (Smith et Hallett 1999). Un autre médiateur chimique souvent employé en horticulture comme retardant de croissance est l'éthéphon. Ce régulateur de croissance a été utilisé avec succès pour inhiber la croissance en hauteur de la tige de l'épinette noire (Walsh 1993). L'éthéphon se dégrade en éthylène, un régulateur de croissance des plantes souvent associé aux conditions de stress (Abeles 1973). Cependant, il n'y aurait pas de relation entre les stress causés par la sécheresse et la production d'éthylène (Narayana 1991; Eklund et al. 1992). Par contre, l'éthéphon pourrait moduler l'induction et la durée de la dormance chez le pommier (Hauagge et Cummins 1991) et le pêchier (Crisosto et al. 1989). Chez *Pinus elliotii* et *P. taeda*, l'éthéphon n'induit pas la dormance mais retarde le débourrement printanier (Gagnon et Johnson 1988). L'éthéphon par contre induirait la dormance chez la pruche de l'Ouest (*Tsuga heterophylla*) (Cheung 1975). Des études seraient nécessaires pour valider ces résultats à grande échelle dans son application pour contrôler la taille et l'induction de la dormance des plants d'épinette noire cultivés en récipient 113-25.

Doit-on vraiment s'inquiéter pour la survie en plantation des plants 113 à cause des périodes de sécheresse ? Malgré tout, le suivi du taux de survie des PPD des plantations 2003 et 2004 mesurés en 2005 était supérieur ou égale à 95% (J.-P. Girard, communication personnelle). En gros, nos résultats montrent que des semis d'épinette noire plantés dans des conditions mimant une sécheresse pourraient survivre pendant 21 jours, sauf pour les plants cultivés dans le récipient 113-25 livrables en juin où la période est plus courte. En Finlande, la probabilité d'incidence d'une période sans pluie diminue exponentiellement avec sa durée et est de l'ordre de quelque % pour 21 jours de sécheresse (Helenius 2005). Pour le Canada, durant la période s'étendant de 1940-2002, les cinq étés (JJA) les plus secs étaient 2002, 1941, 1998, 1961 et 1940 (Shabbar et Skinner 2004); dans la région laurentienne et boréale du Québec, l'indice Palmer de sévérité de la sécheresse (PDSI) variait entre -0,5 et -1,5 ce qui est considéré comme une sécheresse légère. Même si la tendance est à une diminution progressive de l'indice de sécheresse tout au long du siècle dernier, il s'est produit 10 épisodes de sécheresse légère à modérée au cours de ce siècle dans

l'Est du Canada (Girardin et Wotton 2009). Ces tendances pourraient changer dans le futur en raison du réchauffement global. L'augmentation des précipitations projetée par les modèles climatiques globaux serait insuffisante pour compenser les augmentations des températures, ce qui causerait une augmentation des périodes de sécheresse et des feux de forêt (Girardin et Mudelsee 2008). L'incidence de la sécheresse pourrait s'aggraver dans le futur avec le réchauffement climatique global puisqu'on prévoit une augmentation de l'évapotranspiration et une diminution simultanée de l'humidité du sol (Saxe et al. 2001). Le suivi des plantations devrait donc être maintenu pour vérifier la

## CONCLUSION

Les mesures des paramètres physiologiques des échanges gazeux et des potentiels hydriques dans un dispositif expérimental mimant les conditions de plantation en forêt nous a permis de d'évaluer le potentiel d'adaptation aux stress hydriques des plants d'épinette noire cultivés en récipient 113-25. Les calendriers de production des pépinières tant gouvernementales que privés du Saguenay-Lac-Saint-Jean permettent de fournir ces plants durant toute la période de reboisement qui s'échelonne du début juin à la fin août. Il est donc impératif que les régions de culture de ces plants leur confèrent une bonne résistance face aux conditions exigeantes qui prévalent sur les aires de reboisement en forêt boréale.

Notre hypothèse de départ était que la résistance au stress des plants produits en récipient 113-25 pourrait être inférieure aux autres types de production plus conventionnels et varier entre les lots livrables en juin, juillet et août. Cette hypothèse est largement réfutée dans le sens que les paramètres physiologiques reliés à la résistance aux stress hydriques se comparent dans la majorité des cas à ceux des plants conventionnels produits dans les récipients 67-50 ou 45-110. Cependant, certains résultats isolés nous forcent à être prudent. Dans le cas des plants livrables en juin, le  $\Psi_{mijour}$  des 113-25 jours-courts et témoins demeurait plus bas que la normale même après une période de récupération de sept jours qui suivait le traitement de stress hydrique. Cette donnée suggère que ces plants pourraient atteindre le point de flétrissement plus rapidement que les plants produits en 67-50 ou 45-110. Le traitement de jours-courts n'a pas conféré aux plants 113-25 livrables en juin une résistance suffisante. Il faut préciser cependant que le traitement de jours-courts s'est terminé juste avant la plantation expérimentale et, de ce fait, les plants traités n'étaient pas complètement endurcis

même si la formation du bourgeon terminal était amorcée. Par ailleurs, le potentiel photosynthétique n'a pas été affecté par le stress hydrique et a retrouvé son niveau normal après la période de récupération. Ce fait est corroboré par les valeurs des taux relatifs de croissance (TRC) supérieurs ou égaux à ceux des 67-50 ou 45-110.

Dans l'expérience en juillet, toutes les variables physiologiques des plants 113-25 étaient égaux ou même supérieurs à ceux des plants 67-50 ou 45-110, sauf pour la photosynthèse. Dans ce cas-ci, les 113T avaient un taux photosynthétique bien inférieur aux trois autres types de plants après la période de récupération qui a suivi le traitement de stress hydrique; même si cette mesure est instantanée, la croissance ultérieure au stress hydrique pourrait en être affectée à la baisse. Ces résultats montrent aussi que, contrairement aux plants livrables en juin, le traitement de jours-courts a conféré une protection suffisante contre le stress hydrique puisque les valeurs physiologiques et de croissance relative des plants 113JC étaient supérieures à tous les types de plant étudiés. Le traitement de jours-courts a eu lieu cinq semaines avant la plantation expérimentale ce qui laissait amplement le temps pour l'endurcissement des plants et le développement d'un système racinaire robuste.

Dans l'expérience en août, l'aoûtement naturel des plants, quoiqu'incomplet dans le cas des plants 113T, a sans doute été un facteur déterminant pour expliquer la résistance aux stress hydriques. Tous les variables physiologiques montrent un rétablissement complet des plants après les trois semaines de traitement de stress hydrique. L'aoûtement artificiel en juin des plants 113-JC a sans doute augmenté leur résistance au stress hydrique puisque les valeurs de  $\Psi_{\text{préaube}}$  et de  $\Psi_{\text{mijour}}$  étaient moins négatives que pour les autres types de plants. Malgré leur petite taille, ces plants montrent d'ailleurs un potentiel de croissance certain malgré des conditions environnementales adverses.

En conclusion, cette expérience montre qu'il est possible de reboiser des plants produits dans des récipients 113-25 tout au long de la saison estivale. Si le traitement de jours-courts est utilisé principalement pour contrôler la hauteur de la tige, il confère simultanément une résistance au stress hydrique pour les plants livrables en juillet ou août. La plantation de plants 113-25 en juin demeure cependant plus problématique. Comme le calendrier de production est serré, le traitement de jours-courts n'a pas le temps d'induire l'endurcissement complet des plants. Cela ne signifie pas

que les plants 113-25 sont impropres à la plantation tôt en saison mais qu'il serait judicieux d'éviter les microsites xériques comme les monticules sur des sols à drainage rapide. De plus, des recherches devraient être entreprises pour trouver des méthodes permettant de conditionner ces plants aux stress hydriques.

## RÉFÉRENCES

- Abeles, F.B. 1973. Ethylene in plant biology. Academic Press, NY.
- Addington, R.N., Mitchell, R.J., Oren, R. et Donavan, L.A. 2004. Stomatal sensitivity to vapor pressure deficit and its relationship to hydraulic conductance in *Palus palustris*. *Tree Physiol.* 24 : 561-569.
- Adekskold, G. et Orlander, G. 1990. Planting spot selected on mechanically prepared sites. Result No. 8; Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. [An unofficial translation by Ernst Stjernberg, R.P.F. FERIC, Western Division]. Silviculture Branch, Victoria, B.C. 7 p.
- Arnott, J.T. 1981. Survival and growth of bullet, styroplug and bareroot seedlings on mid-elevation sites in coastal British Columbia. *For. Chron.* 57 : 65-70.
- Ashimoto, H., Dungan, J.L., White, M.A., Yang, F., Michaelis, A.R., Running, S.W. et Nemani, R.R. 2008. Satellite-based estimation of surface vapor pressure deficits using MODIS land surface temperature data. *Remote Sensing of Environ.* 113: 142-155.
- Balinski, A.C., Saloni, P., Walli, C. et Brinkman, D. 1995. Seedling roots and forest floor: misplaced and neglected aspects of British Columbia's reforestation effort ? *For. Chron.* 71(1): 59-65.
- Bernier, P.Y., Lamhamedi, M.S. et Simpson, D.G. 1995a. Shoot: root ratio is of limited use in evaluating the quality of container conifer stock. *Tree Planters' Notes* 46(3): 102-106.
- Bernier, P.-Y., Stewart, J.D. et Gonzalez, A. 1995b. Effects of the physical properties of *Sphagnum* peat on water stress in containerized *Picea mariana* seedlings under simulated field conditions. *Scand. J. For. Res.* 10: 184-189.
- Blake, T.J. et Li, J. 2003. Hydraulic adjustment in jack pine and black spruce seedlings under controlled cycles of dehydration and rehydration. *Physiol. Plant.* 117: 532-539.
- Boucher, J.-F., Munson, A.D. et Bernier, P.Y. 1995. Foliar absorption of dew influences shoot water potential and root growth in *Pinus strobus* seedlings. *Tree Physiol.* 15: 819-823.
- Brix, H. 1979. Effects of plant water stress on photosynthesis and survival of four conifers. *Can. J. For. Res.* 9: 160-165.

- Burdett, A.N. 1979. New methods for measuring root growth capacity: their value in assessing lodgepole pine stock quality. *Can. J. For. Res.* 9: 63-67.
- Burdett, A.N. 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Can. J. For. Res.* 20: 415-427.
- Buxton, G.F., Cyr, D.R. et Dumbroff, E.B. 1985. Physiological responses of three northern conifers to rapid and slow induction of moisture stress. *Can. J. For. Res.* 63: 1171-1176.
- Calmé, S., Margolis, H.A. et Bigras, F.J. 1993. Influence of cultural practices on the relationship between frost tolerance and water content of containerized black spruce, white spruce, and jack pine seedlings. *Can. J. For. Res.* 23: 503-511.
- Cheung, K.-W. 1975. Induction of dormancy in container-grown western hemlock: effects of growth retardants and inhibitors. Research Note no. 73. BC Forest Serv. Res. Div. Victoria, BC. 9 p.
- Colombo, S.J. 1987. Changes in osmotic potential, cell elasticity, and turgor relationships of 2<sup>nd</sup>-year black spruce container seedlings. *Can. J. For. Res.* 17: 365-369.
- Colombo, S.J. 1990. Bud dormancy status, frost hardiness, shoot moisture content, and readiness of black spruce container for frozen storage. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 115(2): 302-307.
- Colombo, S.J. et Timmer, V.R. 1992. Limit to high temperatures causing direct and indirect damage to black spruce. *Tree Physiol.* 11 : 95-104.
- Colombo, J., Sampson, P.H., Templeton, C.W.G., McDonough, T.C., Menes, P.A., DeYoe, D. et Grossnickle, S.C. 2001. Chap. 16 : Assessment of nursery stock quality in Ontario. *Dans* Regenerating the canadian forest: principles and practice for Ontario. R.G. Wagner et S.J. Colombo (eds.). Markham, Ont. Fitzhenry & Whiteside: 307-323.
- Coutts, M.P. 1981. Effects of root or shoot exposure before planting on the water relations, growth, and survival of Sitka spruce. *Can. J. For. Res.* 11 : 703-709.
- Cregg, B.M. 1994. Carbon allocation, gas exchange, and needle morphology of *Pinus ponderosa* genotypes known to differ in growth and survival under imposed drought. *Tree Physiol.* 14 : 883-898.
- Cregg, B.M. et Zhang, J.W. 2001. Physiology and morphology of *Pinus sylvestris* seedlings from diverse sources under cyclic drought stress. *For. Ecol. Manage.* 154 : 131-139.
- Crisosto, C.H., Lombard, P.B. et Fuchigami, L.H. 1989. Fall ethephon delays bloom in 'Redhaven' peach by delaying flower differentiation and development during dormancy. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114(6): 881-884.
- Dancause, A. 2008. Le reboisement au Québec. Les Publications du Québec, Québec. 177 p.
- Danielsson, M., Kanaste, A., Lindstrom, A., Hellqvist, C., Stattin, E., Langstrom, B. et Borg-Karlson, A.-K. 2008. Mini-seedlings of *Picea abies* are less attacked by *Hylobius abietis* than conventionnal ones : is plant chemistry the explanation ? *Scand. J. For. Res.* 23 : 299-306.
- Darlington, A.B., Halinska, A., Dat, J.F. et Blake, T.J. 1997. Effects of increasing saturation vapour pressure deficit on growth and ABA levels in black spruce and jack pine. *Trees* 11: 223-228.
- Day, M.E. 2000. Influence of temperature and leaf-to-air vapor pressure deficit on net photosynthesis and stomatal conductance in red spruce (*Picea rubens*). *Tree Physiol.* 20: 57-63.
- DeLucia, E.H. et Schlesinger, W.H. 1991. Resource-use efficiency and drought tolerance in adjacent Great Basin and sirran plants. *Ecology* 72(1): 51-58.
- de Miguel, M., Sanchez-Gomez, D., Cervera, M.T., et Aranda, I. 2011. Functional and genetic characterization of gas exchange and intrinsic water use efficiency in a full-sib family of *Pinus pinaster* Ait. in response to drought. *Tree Physiol.* 32: 94-103.
- Eklund, L., Cienciala, E. et Hällgren, J.-E. 1992. No relation between drought stress and ethylene production in Norway spruce. *Physiol. Plant.* 86: 297-300.
- Environnement Canada 2012. Normales climatiques au Canada 1971-2000. [[http://climate.weatheroffice.gc.ca/climate\\_normals](http://climate.weatheroffice.gc.ca/climate_normals)]. Mise-à-jour le 2012-05-29.
- Fan, S. 1994. Drought tolerance of three species from different ecological zones. Ph.D. thesis, University of Toronto, Toronto, Ont.
- Fan, S. et Grossnickle S.C. 1998. Comparison of gas exchange parameters and shoot water relations of Interior spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss x *Picea engelmannii* Parry ex Engelm.) clones under repeated soil drought. *Can. J. For. Res.* 28: 820-830.
- Fan, S., Blake, T.J. et Blumwald, E. 1994. The relative contribution of elastic and osmotic adjustments to turgor maintenance of woody species. *Physiol. Plant.* 90: 408-413.
- Folk, R. et Grossnickle, S.C. 1996. Determining field performance potential with the use of limiting environmental conditions. *New Forests* 13: 121-138.
- Gagnon, K.G. et Johnson, J.D. 1988. Bud development and dormancy in slash and loblolly pine. II. Effects of ethephon applications. *New For.* 2: 269-274.
- Gardner, A.C. 1981. Field performance of containerized seedlings in interior British Columbia. *Proc.*,



- Containerized Tree Seedling Symp.; 1981, sept. 14-16; Toronto, Ont.: 299-305.
- Génére, B. 1998. Five-year field performance of two types of Douglas fir mini-plug transplants in three forest sites in France. *Ann. Sci. For.* 55(8): 885-897.
- Girardin, M.P. et Mudelsee, M. 2008. Past and future changes in Canadian boreal wildfire activity. *Ecol. Appl.* 18(2): 391-406.
- Girardin, M.P. et Wotton, B.M. 2009. Summer moisture and wildfire risks across Canada. *J. Appl. Meteor. Climat.* 48: 517-533.
- Girardin, M.-P., Tardif, J., Flannigan, M.D., Wotton, B.M. et Bergeron, Y. 2004. Trends and periodicities in the Canadian drought code and their relationships with atmospheric circulation for the southern Canadian boreal forest. *Can. J. For. Res.* 34: 103-119.
- Girardin, M.-P., Tardif, J., Flannigan, M.D. et Bergeron, Y. 2006. Forest fire-conductive drought variability in the southern Canadian boreal forest and associated climatology inferred from tree rings. *Can. Water Res. J.* 31(4): 275-296.
- Groot, A., Carlson, D.W., Fleming, R.L. et Wood, J.E. 1997. Small openings in trembling aspen forest: microclimate and regeneration of white spruce and trembling aspen. NODA/NFP Tech. Rep. TR-47. Nat. Res. Can. Can. For. Serv., Great Lakes Forestry Centre, Sault Ste. Marie, Ont.
- Grossnickle, S.C., 2000. *Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings*. NRC Research Press. Ottawa. 409 p.
- Grossnickle, S.C. 2005. Importance of root growth in overcoming planting stress. *New Forests*. 30: 273-294.
- Grossnickle, S.C. 2012. Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New Forests* 43: <http://www.springerlink.com/content/0169-4286/preprint/?sort=p-OnlineDate&sortorder=desc&o=10>. 28 p.
- Grossnickle, S.C. et T.J. Blake 1986. Environmental and physiological control of needle conductance for bare-root black spruce, white spruce, and jack pine seedlings on boreal cutover sites. *Can. J. Bot.* 64 : 943-949.
- Grossnickle, S.C. et Fan, S. 1998. Genetic variation in summer gas exchange patterns of interior spruce (*Picea glauca* x *Picea engelmannii* Parry ex Engelm.). *Can. J. For. Res.* 28 : 831-840.
- Grossnickle, S.C. et Folk, R.S. 1993. Stock quality assessment: forecasting survival of performance on a reforestation site. *Planters' Notes* 44(3): 113-121.
- Grossnickle, S.C. et Folk, R.S. 2003. Spring versus summer spruce stocktypes of western Canada: nursery development and field performance. *Western J. Appl. For.* 18(4): 267-275.
- Grossnickle, S.C., Arnott, J.T., Major, J.E. et Tschaplinski, T.J. 1991a. Influence of dormancy induction treatments on western hemlock seedlings. I. Seedling development and stock quality assessment. *Can. J. For. Res.* 21 : 164-174.
- Grossnickle, S.C., Major, J.E., Arnott, J.T. et Lemay, V.M. 1991b. Stock quality assessment through an integrated approach. *New Forests*. 5: 77-91.
- Guldin, R.W. 1982. What does it cost to grow seedlings in containers? *Tree Planters' Notes* 33: 34-37.
- Haase, D.L. 2001. Understanding forest seedling quality: measurements and interpretation. *Tree Planters' Notes* 52(2): 24-30.
- Hahn, P.F. 1990. The use of styroblock 1 & 2 containers for P+1 transplant stock production. *Dans* : R. Rose, S.J. Cambell, T.D. Landis (eds.). *Proc., Western Forest Nursery Association*; 1990 august 13-17; Roseburg, OR. General Technical Report RM-200. Fort Collins, Co.: USDA For. Serv., Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station: 223-230.
- Hauagge, R. et Cummins, J.N. 1991. Age, growing temperatures, and growth retardants influence induction and length of dormancy in *Malus*. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116(1): 116-120.
- Hawkins, C.D.B., Eng, R.Y.N. et Krasowski, M.J. 1994. Short day nursery treatment promotes photosynthesis in Interior spruce seedlings: summary of poster. *Proc., Forest and Conservation Nursery Associations*. 1994, july 11-14; Williamsburg, VA. Gen. Tech. Rep. RM-GTR-257. Fort Collins, CO: USDA For. Serv., Rocky Mountain Forest and range Experiment station: 268-270.
- Hébert, F., Gagnon, D. et D. Lord 2005. Production de plants d'épinette noire de petites dimensions (PPD): transfert technologique. UQAC. Chicoutimi. 53 p.
- Hébert, F., Boucher, J.-F., Bernier, P.Y. et Lord, D. 2006. Growth response and water relations of 3-year-old planted black spruce and jack pine seedlings in site prepared lichen woodlands. *For. Ecol. Manage.* 223: 2236-236.
- Hébert, F., Thiffault, N., Ruel, J.-C., et Munson, A.D. 2010. Comparative physiological responses of *Rhododendron groenlandicum* and regenerating *Picea mariana* following partial canopy removal in northeastern Quebec, Canada. *Can. J. For. Res.* 40. 1791-1802.
- Hee, S.M. 1987. Freezer storage practices at Weyerhaeuser nurseries. *Tree Planters' Notes*. 38(3): 7-10
- Hee, S.M., Stevens, T.S. et Walch, D.C. 1988. Production aspects of mini-plug transplants. *Dans* T.D. Landis, technical coord. *Proc., Combined Meeting of the Western Forest Nursery Associations*; 1988 august

- 8-11; Vernon, BC. Gen. Tech. Rep. RM-167. Fort Collins, Co. USDA For. Serv., Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station: 168-171.
- Heide, O.M. 1974. Growth and dormancy in Norway spruce ecotypes (*Picea abies*) I. Interaction of photoperiod and temperature. *Physiol. Plant.* 30: 1-12
- Heiskanen, J. et Rikala, R. 2000. Effect of peat-based container media on establishment of Scots pine, Norway spruce and silver birch seedlings after transplanting in contrasting water conditions. *Scand. J. For. Res.* 15: 49-57.
- Helenius P. 2005. Extension of the planting period of Norway spruce container seedlings : risks related to the drought – growth stage dynamics and handling practices. Academic dissertation. Faculty of Agriculture and Forestry of the University of Helsinki. 46 p.
- Helenius, P., Luoranen, J. et Rikala, R. 2005. Effect of preplanting drought on survival, growth and xylem water potential of actively growing *Picea abies* container seedlings. *Scand. J. For. Res.* 20: 103-109.
- Herrington, T. 2010. The Canadian boreal landscape: an interdisciplinary look at effects of climate change on the boreal forest. [<http://www.tylerherringtonscholasticwork.com/resources/>]. 87 p.
- Hinesley, L.E. et Snelling, L.K. 1991. Vapor pressure deficit, temperature, and light affect postharvest drying of Fraser fir and Eastern white pine. *Hortscience* 26(4): 402-405.
- Hodgson J. 2011. Repetitive reaction and restitution (R<sup>3</sup>) induction of drought hardiness in conifer container seedlings. *Dans* L.E. Riley, D.L. Haase et H.R. Pinto, techn. coord. National proceedings: Forest and Conservation Nursery Association – 2010. Proc. RMRS-P-65. Fort Collins, Co: USDA For. Serv., Rocky Mountain research Station: 83-86.
- Hoffmann, W.A. et Poorter, H. 2002. Avoiding bias calculations of relative growth rate. *Ann. Bot.* 80: 37-42.
- Jobidon, R., Charette, L., et Bernier, P.Y. 1998. Initial size and competing vegetation effects on water stress and growth of *Picea mariana* (Mill.) BSP seedlings planted in three different environments. *For. Ecol. Manage.* 103: 293-305.
- Johansson, K.M. 2004. Interactions between site preparation, seedling type and genetics on the establishment of Norway spruce. Ph. D. thesis. Faculty of North Carolina State University, Raleigh, NC. 66 p.
- Johansson, K.M., Nilsson, U. et Allen, H.L. 2007. Interactions between soil scarification and Norway spruce seedling types. *New Forests* 33 : 13-27.
- Kiiskila, S. 2005. Effect of plants date on stand establishment. *Dans* The Thin Green Line A symposium on the state-of-the-art in reforestation. Compiled by S.J. Colombo.
- July 26-28, 2005, Thunder Bay, Ont., Can. Ont. Min. Nat. Res., Sault-Ste. Marie, Ont.: 102-106.
- Kirk, 1982. Experimental design. Second Edition. Wadsworth, Inc., Belmont, Ca. 911 p.
- Kohmann, K. et Johnsen, O. 2007. Effects of early long-night treatment on diameter and height growth, second flush and frost tolerance in two-year-old *Picea abies* container seedlings. *Scand. J. For. Res.* 22: 375-383.
- Lambany, G. 1994. La dynamique morphologique et physiologique de plants soumis à un entreposage de longue durée. Mémoire de recherché forestière no 114. Gouv. du Québec, Min. Res. Nat., Dir. de la Rech. For. 32 p.
- Lamhamedi, M.S. et Bernier, P.Y. 1994. Ecophysiology and field performance of black spruce (*Picea mariana*): a review. *Ann. Sci. For.* 51: 529-551.
- Lamhamedi, M.S, Bernier, P.Y. et Hébert, C. 1996. Effect of shoot size on the gas exchange and growth of containerized *Picea mariana* seedlings under different watering regimes. *New Forests* 13: 207-221.
- Lamhamedi, M.S., Bernier, P.Y., Hébert, C. et Jobidon, R. 1998. Physiological and growth responses of three sizes of containerized *Picea mariana* seedlings outplanted with and without vegetation control. *For. Ecol. Manage* 110: 12-23.
- Landis. T.D. 1989. Chap. 2. Irrigation and water management. *Dans* The container tree nursery manual. Volume four: seedling nutrition and irrigation. T.D. Landis, R. W. Tinus, S.E. McDonald et J.P. Barnett (eds.). USDA For. Serv. Agric. Handbook 674: 102 p.
- Landis, T.D. 2007. Miniplug transplants: producing large plants quickly. *Dans* : Riley, L. E.; Dumroese, R. K.; Landis, T. D., tech. coords. National proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations—2006. Proc. RMRS-P-50. Fort Collins, CO: U.S. USDA For. Serv., Rocky Mountain Research Station. Online: <http://www.rmnr.net/nurseries/publications/proceedings>. 12 p.
- Landis, T.D., Tinus, R.W., McDonald, S.E. et Barnett, J.P. 1992. The container tree nursery manual – Volume three Atmospheric environment. USDA For. Serv. Agric. Handbook 674. 145 p.
- Larcher, W. 2003. Physiological plant ecology – Ecophysiology and stress physiology of functional groups. 4<sup>th</sup> Edition, Springer, Berlin. 513 p.
- Lindstrom, A., Hellqvist, C. et Stattin, E. 2005. Mini seedlings – a new forest regeneration system. *Dans* The Thin Green Line A symposium on the state-of-the-art in reforestation. Compiled by S.J. Colombo. July 26-28, 2005, Thunder Bay, Ont. Can. Ont. Min. Nat. Res., Sault-Ste. Marie, Ont.: 56-58.
- Luoranen, J. et Rikala, R. 2012. Early short-day treatment did not affect the field performance of *Pinus sylvestris*

- container seedlings in summer planting. *Scand. J. For. Res.* 27: 1-4.
- Luoranan, J., Rikala, R., Konttinen, K. et Smolander, H. 2005. Extending the planting period of dormant and growing Norway spruce container seedlings to early summer. *Silva Fennica* 39(4): 481-496.
- Luoranan, J., Rikala, R., Konttinen, K. et Smolander, H. 2006. Summer planting of *Picea abies* container-grown seedlings: effects of planting date on survival, height growth and root egress. *For. Ecol. Manage.* 237: 534-544.
- Luoranan, J., Helenius, P., Huttunen, L. et Rikala, R. 2007. Short-day treatment enhances root egress of summer-planted *Picea abies* seedlings under dry conditions. *Scand. J. For. Res.* 22: 384-389.
- Luoranan, J., Konttinen, K. et Rikala, R. 2009. Frost hardening and risk of a second flush in Norway spruce seedlings after and early-season short-day treatment. *Silva Fennica* 43(2): 235-247.
- Luoranan, J., Rikala, R. et Smolander, H. 2011. Machine planting of Norway spruce by Bråke and Ecoplanter: an evaluation of soil preparation, planting method and seedling performance. *Silva Fennica* 45(3): 341-357.
- Macadam, A. et Bedford, L. 1998. Mounding in the sub-boreal spruce zone of west-central British Columbia: 8-year results. *For. Chron.* 74(3): 421-427.
- Margolis, H.A. et Brand, D.G. 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Can. J. For. Res.* 20: 375-390.
- Marshall, J.G. et Dumbroff, E.B. 1999. Turgor regulation via cell wall adjustment in white spruce. *Plant Physiol.* 119: 313-319.
- Marshall, J.G., Scarratt, J.B. et Dumbroff, E.B. 1991. Induction of drought resistance by abscisic acid and paclobutrazol in jack pine. *Tree Physiol.* 8: 415-421.
- Marshall, J.G., Rutledge, R.G., Blumwald, E. et Dumbroff, E.B. 2000. Reduction in turgid water volume in jack pine, white spruce and black spruce in response to drought and paclobutrazol. *Tree Physiol.* 20: 701-707.
- Mattsson, A. 1996. Predicting field performance using seedling quality assessment. *New Forests* 13: 223-248.
- Mexal, J.G. et Landis, T.D. 1990. Target seedling concepts: height and diameter. *Dans* R. Rose, S.J. Campbell et S.J. Landis (eds.). *Proc., Western Forest Nursery Association*; 1990 august 13-17; Roseburg, OR. Gen. Tech. Rep. RM-200. Fort Collins, CO: USDA For. Serv., Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station: 17-35.
- Mohammed, G.H. 1996. The status and future of stock quality testing. *New Forests* 13: 481-504.
- Montgomery, D.C. 1991. Design and analysis of experiments. Third Edition. John Wiley & Sons, New York. 649 p.
- MRNF 2000. Pour une flexibilité accrue, le plant résineux en recipient. Min. Res. Nat., Québec. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/resineux-recipientes.pdf>. [consulté le 12/6/2012]. 4 p.
- MRNF 2008. Guide terrain – Inventaire de qualification des plants résineux cultivés en recipient. Min. Res. Nat. faune, DGSP, Div. de la prod. des plants for., Québec. 131 p.
- MRNF 2011. Guide terrain – Inventaire de qualification des plants résineux cultivés en recipient. Min. Res. Nat. faune, DGSP, Div. de la prod. des plants for., Québec. 139 p.
- Narayana, I., Lalonde, S. et Saini, H.S. 1991. Water-stress-induced ethylene production in wheat. A fact or artifact ? *Plant Physiol.* 96: 406-410.
- Nilsson, U., Luoranan, J., Kolstrom, T., Orlander, G. et Puttonen, P. 2010. Reforestation with planting in northern Europe. *Scand. J. For. Res.* 25: 283-294.
- Odlum, K., Scarratt, J., Timmer, V., Duckett, S. et Ross-Slomke, P. 2001. Container stock production. *Dans* Regenerating the Canadian forests : principles and practice for Ontario. R.G. Wagner et S.J. Colombo (eds.). Fitzhenry & Whiteside, Markham, Ont. : 281-306.
- Oleras, K. 2008. Markberedningens, planteringspunktens och behållardjupets inflytande på granminiplantors etablering i fält./ Influence of scarification, plantation spot, and container depth on the field establishment of mini spruce seedlings. Mémoire, faculté des Sciences Forestières, Univ. SLU, Suède. 16 p.
- Olivas-Garcia, J.M., Cregg, B.M. et Hennessey, T.C. 2000. Genotypic variation in carbon isotope discrimination and gas exchange of ponderosa pine seedlings under two levels of water stress. *Can. J. For. Res.* 30: 1581-1590.
- Orlander, G. et Due, K. 1986. Location of hydraulic resistance in the soil-plant pathway in seedlings of *Pinus sylvestris* L. grown in peat. *Can. J. For. Res.* 16: 115-123.
- Paquette, A., Girard, J.-P. et Walsh, D. 2011. Deep planting has no short- or long-term effect on the survival and growth of white spruce, black spruce, and jack pine. *Northern J. Appl. For.* 28(3): 146-151.
- Paquin, R., Margolis, H.A., Doucet, R. et Coya, M.R. 2000. Physiological responses of black spruce layers and planted seedlings to nutrient addition. *Tree Physiol.* 20: 229-237.
- Ritchie, G.A. 1984. Assessing seedling quality. *Dans* Forest nursery manual: production of bareroot seedlings. Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers. The Hague/Boston/Lancaster, for Forest Research Laboratory,

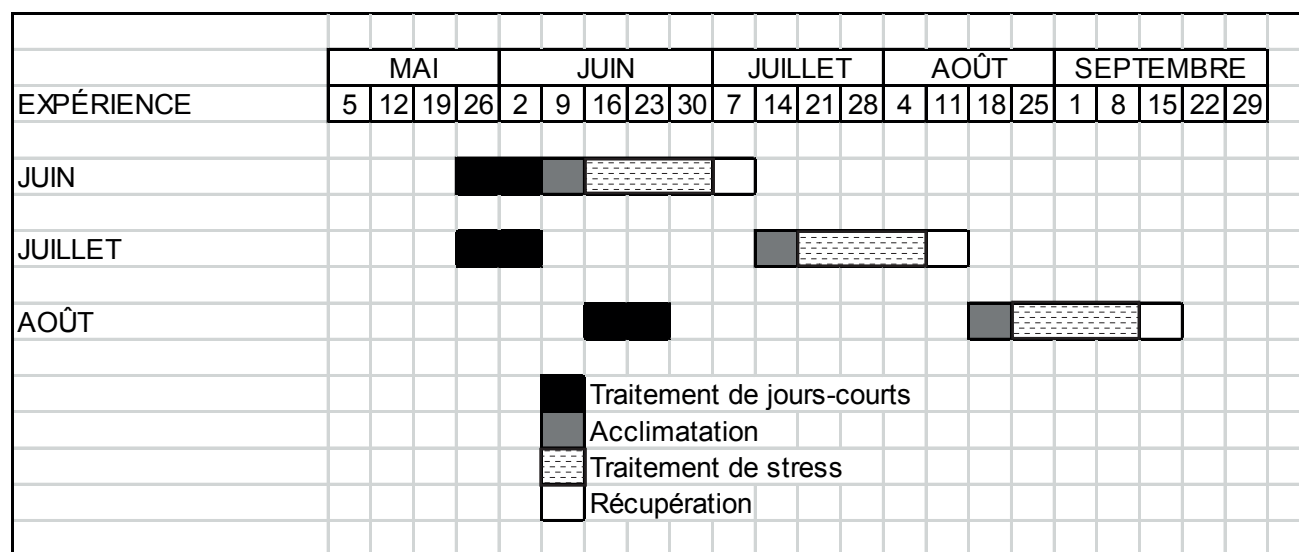


- Ritchie, G.A. et Hinckley, G.A. 1975. The pressure chamber as an instrument for ecological research. *Adv. Ecol Res.* 9: 165-254.
- Saxe, H., Cannell, M.G.R., Johnsen, O., Ryan, M.G. et Vourlitis, G. 2001. Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytol.* 149: 369-400.
- Scarrat, J.B. 1989. Intermediate transplanting of black spruce mini-plug seedlings into paperpots. *Tree Planter' Notes.* 40: 18-21.
- Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.D. et Hemmingsen, E.A. 1965. Sap pressure in vascular plants, negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science* **148**(3668): 339-346.
- Shabbar, A. et Skinner, W. 2004. Summer drought patterns in Canada and the relationship to global sea surface temperatures. *J. Climate.* 17:2866-2880.
- Smit, J. et Van Den Driessche, R. 1992. Root growth and water use efficiency of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) and lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.) seedlings. *Tree Physiol.* 11: 401-410.
- Smith, R.F. et Hallett, R.D. 1999. Inducing dormancy in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) seedlings with paclobutrazol (CONFER®). Proc., Twenty-sixth annual meeting. Plant Growth Regulation Society of America joint with Western Plant Growth Regulator Society supported by Pesticide Applicators Professional Association (PAPA). July 11-14, 1999. Costa Mesa, CA, USA : 147-151.
- South, D.B. et Mitchell, R.G. 2005. A root-bound index for container-grown pines. *Dans* The Thin Green Line A symposium on the state-of-the-art in reforestation. Compiled by S.J. Colombo. July 26-28, 2005, Thunder Bay, Ont. Can. Ont. Min. Nat. Res., Sault-Ste. Marie, Ont.: 92-97.
- South, D.B. et Mitchell, R.G. 2006. A root-bound index for evaluating planting stock quality of container-grown pines. *Southern African Forestry Journal.* 207: 47-54.
- Stewart, J.D. et Bernier, P.-Y. 1995. Gas exchange and water relations of 3 sizes of containerized *Picea mariana* seedlings subjected to atmospheric and edaphic water stress under controlled conditions. *Ann. Sci. For.* 52 : 1-9.
- Sutherland, D.C. et Day, R.J. 1988. Container volume affects survival and growth of white spruce, and jack pine seedlings : a literature review. *Northern J. Applied For.* 5 : 185-189.
- Tan, W. 2007. Impacts of nursery cultural treatments on stress tolerance in 1+0 container white spruce (*Picea glauca* [Moench] Voss) seedlings for summer planting. *New Forests* 33 : 93-107.
- Tan, W. et Blake, T.J. 1997. Gas exchange and water relations responses to drought of fast- and slow-growing black spruce families. *Can. J. Bot.* 75 : 1700-1706.
- Tan, W., Blanton, S. et Bielech, J.P. 2008. Summer planting performance of white spruce 1+0 container seedlings affected by nursery short-day treatment. *New Forests* 35 : 187-205.
- Tanaka, Y., Dobrowski, A., Figueroa, P. et Meade, R. 1988. Field performance of mini-plug transplants. *Dans* T.D. Landis, technical coord. Proc., Combined Meeting of the Western Forest Nursery Associations; 1988 august 8-11; Vernon, BC. Gen. Tech Rep. RM-167. Fort Collins, Co. USDA For. Serv., Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station: 172-181.
- Tear, E.C., Higginbotham, K.O. et Mayo, J.M. 1982. Effects of drying soils on survival of young *Picea glauca* seedlings. *Can. J. For. Res.* 12 : 1005-1009.
- Thiffault, N. 2004. Stock type in intensive silviculture : a (short) discussion about roots ans size. *For. Chron.* 80(4) : 463-468.
- Thiffault, N., Roy, V., Prément, G., Cyr, G., Jobidon, R. et Ménérier, J. 2003. La sylviculture des plantations résineuses au Québec. *Nat. Can.* 127(1) : 63-80.
- Thompson, B.E. 1985. Seedling morphological evaluation – what you can tell by looking. Proc. : Evaluation seedling quality principles, procedures and predictive abilities of major tests. Workshop held oct. 15-18, 1984. For. Res. Labo., Oregon State University, Corvallis : 59-71.
- Turner, N.C. 1988. Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. *Irrig. Sci.* 9 : 289-308
- Van Den Driessche, R. 1996. Drought resistance and water use efficiency of conifer seedlings treated with paclobutrazol. *New Forests* 11 : 65-83.
- Van Herk, I.G., Gower, S.T., Bronson, D.R. et Tanner, M.S. 2011. Effects of climate warming on canopy water dynamics of a boreal black spruce plantation. *Can. J. For. Res.* 41 : 217-227.
- Walsh, D. 1993. Gauchissement de la tige et croissance de semis de conifères traités à l'éthylène et soumis à l'anaérobiose racinaire. Mémoire de Maitrise. UQAC. Chicoutimi, Québec. 152 p.
- Walsh, D. et Lord, D. 2003. Performance en plantation du pin gris en récipients 126-25. UQAC, Chicoutimi, Québec. 4 p.
- Walsh, D. et Lord, D. 2012. Effet de la taille des semis d'épinette noire sur la résistance au stress hydrique. UQAC, Chicoutimi. 11 p.
- Walsh, D., Allaire, J. et Lord, D. 2002. Performance en plantation de plants d'épinette noire de petites dimensions : rapport d'étape pour la période 2001-2002. UQAC, Chicoutimi, Québec [<http://dsf.uqac.ca/>]

- Walsh, D., Allaire, J. et Lord, D. 2011. Survie et croissance de mini-plants d'épinette noir reboisés en forêt boréale : Bilan de 10 ans en plantation. UQAC, Chicoutimi, Québec. [<http://dsf.uqac.ca/boreale/>]. 18 p.
- Whaley, R.E. et Buse, L.J. 1996. Mini-plug seedlings and shelter seeding on three moisture regimes in the Pakwash forest. Ont. Min. Natur. Resour. Northwest Sci. & Technol., Thunder bay, Ont. NWST Tech. Rep. TR-99. 6 p.
- Whaley, R.E., Buse, L.J. et Baker, W.D. 1995. Freezer versus outdoor overwinter storage of black spruce container stock. Northwest Region Science and Technology Tech. Rep. 76. Ont. Min. nat. Res. Thunder Bay, Ont. 16 p.
- Wilson, J.B. 1988. A review of evidence on the control of shoot : root ratio, in relation to models. Ann. Bot. 61 : 433-449.
- Yaakoubd, B. 1997. Relations hydriques et formation des racines adventives caulinaires chez les semis d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Qc. 78 p.
- Zhang, J. et Marshall, J.D. 1994. Population differences in water-use efficiency of well-watered and water-stressed western larch seedlings. Can. J. For. Res. 24 : 92-99.
- Zhang, J.W., Feng, Z., Cregg, B.M. et Schumann, C.M. 1997. Carbon isotopic composition, gas exchange, and growth of three populations of ponderosa pine differing in drought tolerance. Tree Physiol. 17 : 461-466.
- Zhang, X., Vincent, L.A., Hogg, W.D. et Niitsoo, A. 2000. Temperature and precipitation trends in Canada during the 20<sup>th</sup> century. Atmosphere-Ocean 38(3) : 395-429.
- Zine ElAbidine, A., Stewart, J.D., Bernier, P.-Y., et Plamondon, A.P. 1995. Diurnal and seasonal variations in gas exchange and water relations of lowland and upland black spruce ecotypes. Can. J. Bot. 73 : 716-722.
- Zwiazek, J.J. et Blake, T.J. 1989. Effects of preconditioning on subsequent water relations, stomatal sensitivity, and photosynthesis in osmotically stressed black spruce. Can. J. Bot. 67 : 2240-2244.



## ANNEXE 1. Calendrier des trois expériences (juin, juillet, août).



ANNEXE 2. Caractéristiques initiales des quatre types de plant d'épinette noire utilisés (A) pour l'expérience juin, (B) l'expérience juillet, (C) l'expérience août. Moyenne  $\pm$  erreur-type, n = 20.

A-)

	<b>IPL-113-25 (jours-courts)</b>	<b>IPL-113-25 (témoin)</b>	<b>IPL-67-50</b>	<b>IPL-45-110</b>
Hauteur (cm)	12,3 $\pm$ 1,5	13,0 $\pm$ 1,1	19,7 $\pm$ 1,7	20,5 $\pm$ 1,9
Diamètre (mm)	1,38 $\pm$ 0,13	1,40 $\pm$ 0,24	2,11 $\pm$ 0,45	2,67 $\pm$ 0,28
Poids sec aérien (g)	0,25 $\pm$ 0,05	0,30 $\pm$ 0,05	0,79 $\pm$ 0,16	1,54 $\pm$ 0,20
Poids sec racines (g)	0,11 $\pm$ 0,03	0,11 $\pm$ 0,03	0,45 $\pm$ 0,12	1,14 $\pm$ 0,31
Aérien/racines	2,42 $\pm$ 0,52	2,91 $\pm$ 0,56	1,82 $\pm$ 0,35	1,41 $\pm$ 0,32
Densité rac. (mg.cm <sup>-3</sup> )	4,3 $\pm$ 0,2	4,3 $\pm$ 0,2	9,0 $\pm$ 0,5	10,4 $\pm$ 0,6
Bourgeon apical (%)	5	5	0	0
Bourgeons latéraux (%)	0	10	90	0

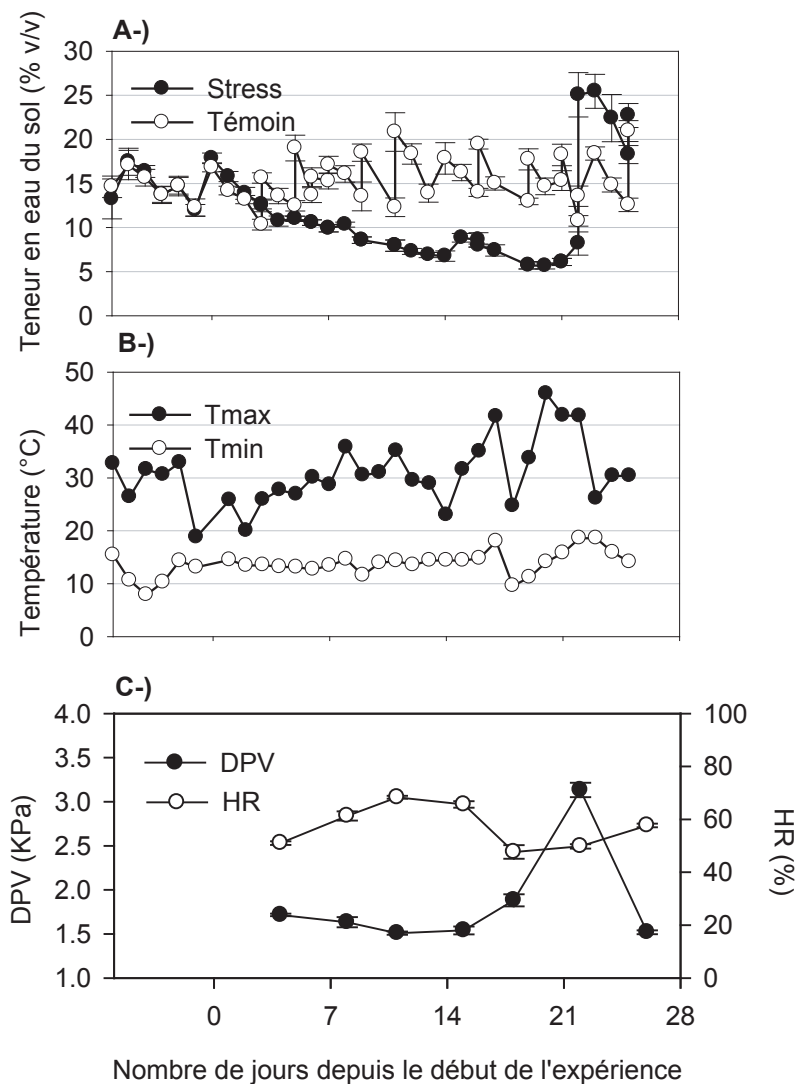
B-)

	<b>IPL-113-25 (jours-courts)</b>	<b>IPL-113-25 (Témoin)</b>	<b>IPL-67-50</b>	<b>IPL-45-110</b>
Hauteur (cm)	14,8 $\pm$ 1,6	16,1 $\pm$ 1,1	17,5 $\pm$ 2,3	22,1 $\pm$ 3,8
Diamètre (mm)	1,85 $\pm$ 0,46	1,78 $\pm$ 0,42	1,96 $\pm$ 0,18	2,83 $\pm$ 0,50
Poids sec aérien (g)	0,54 $\pm$ 0,07	0,51 $\pm$ 0,11	0,63 $\pm$ 0,11	1,61 $\pm$ 0,38
Poids sec racines (g)	0,28 $\pm$ 0,06	0,20 $\pm$ 0,04	0,27 $\pm$ 0,05	0,85 $\pm$ 0,28
Aérien/racines	2,06 $\pm$ 0,50	2,64 $\pm$ 0,51	2,42 $\pm$ 0,36	1,99 $\pm$ 0,48
Densité rac. (mg.cm <sup>-3</sup> )	10,9 $\pm$ 0,6	7,8 $\pm$ 0,4	5,3 $\pm$ 0,2	7,7 $\pm$ 0,6
Bourgeon apical (%)	95	0	5	40
Bourgeons latéraux (%)	100	45	85	70

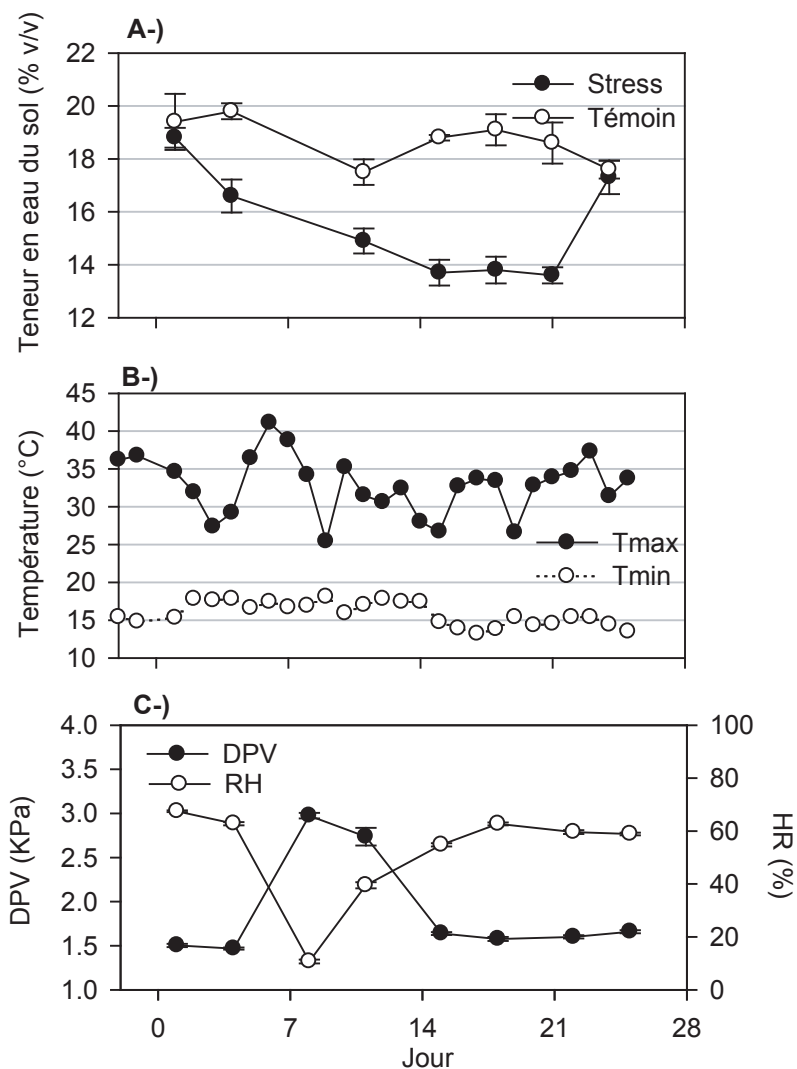
C-)

	<b>IPL-113-25 (jours-courts)</b>	<b>IPL-113-25 (Témoin)</b>	<b>IPL-67-50</b>	<b>IPL-45-110</b>
Hauteur (cm)	7,5 $\pm$ 0,3	12 $\pm$ 0,5	13,8 $\pm$ 0,3	17 $\pm$ 0,4
Diamètre (mm)	1,76 $\pm$ 0,04	1,57 $\pm$ 0,06	2,11 $\pm$ 0,05	2,95 $\pm$ 0,10
Poids sec aérien (g)	0,21 $\pm$ 0,01	0,35 $\pm$ 0,03	0,64 $\pm$ 0,03	1,27 $\pm$ 0,04
Poids sec racines (g)	0,15 $\pm$ 0,01	0,13 $\pm$ 0,01	0,44 $\pm$ 0,03	1,05 $\pm$ 0,06
Aérien/racines	1,37 $\pm$ 0,06	2,70 $\pm$ 0,11	1,48 $\pm$ 0,08	1,27 $\pm$ 0,07
Densité rac. (mg.cm <sup>-3</sup> )	6,0 $\pm$ 0,3	5,4 $\pm$ 0,4	8,9 $\pm$ 0,6	9,6 $\pm$ 0,5
Bourgeon apical (%)	100	30	65	65
Bourgeons latéraux (%)	100	95	100	100

ANNEXE 3A. Sommaire des conditions environnementales dans le tunnel durant l'expérience juin. (A) Teneur en eau du sol. (B) Température minimale et maximale de l'air. (C) Déficit de pression de vapeur (DPV) et humidité relative de l'air (HR).



ANNEXE 3B. Sommaire des conditions environnementales dans le tunnel durant l'expérience juillet. (A) Teneur en eau du sol. (B) Température minimale et maximale de l'air. (C) Déficit de pression de vapeur (DPV) et humidité relative de l'air (HR).



ANNEXE 3C. Sommaire des conditions environnementales dans le tunnel durant l'expérience août. (A) Teneur en eau du sol. (B) Température minimale et maximale de l'air. (C) Déficit de pression de vapeur (DPV) et humidité relative de l'air (HR).

